

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

p. 33

(11)Publication number : 08-285561

(43)Date of publication of application : 01.11.1996

(51)Int.Cl.

G01B 11/30
G01B 9/02

(21)Application number : 08-024242

(71)Applicant : ZYGO CORP

(22)Date of filing : 09.02.1996

(72)Inventor : DE GROOT PETER

(30)Priority

Priority number : 95 417793

Priority date : 06.04.1995

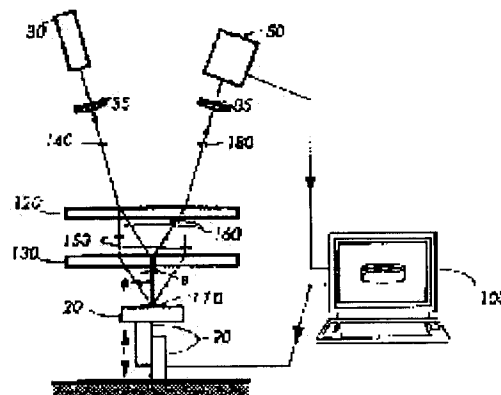
Priority country : US

(54) OBJET SURFACE SHAPE-MEASURING METHOD UTILIZING LARGE EQUIVALENT WAVELENGTH AND SYSTEM THEREFOR

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To accurately measure a surface shape with a wide visual field and a high scanning accuracy by applying light to a desensitizing interferometer with a longer related equivalent wavelength than a light-source-related wavelength by a light source with a related wavelength to obtain desensitizing interference fringes.

SOLUTION: Light from a light source 30 is focused at application rays 140 by a lens 35. The rays 140 are first divided into rays 150 and 160 by a diffraction grating 120. Then, the rays 150 and 160 are diffracted by a diffraction grating 130 and hit against an object 20. An equivalent coherence length is related to the degree of unevenness on the surface of the object 20 and the application area of the light source 30 and the equivalent coherence length can be adjusted when the degree of space coherence of the light source can be changed. The reflection light from the object 20 enters an interference grating 130 again and is diffracted so tint it is synthesized again on the surface of the diffracting grating 120. The resynthesized rays are diffracted by common emission rays 180 and are focused on a camera 50, thus detecting an interference pattern for indicating the difference in the optical path length of the rays 150 and 160.



* NOTICES *

JPO and INPIT are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.*** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

CLAIMS

[Claim(s)]

[Claim 1]A method of measuring shape of an object surface from a suitable work distance to an object using a desensitization interference fringe generated from a desensitization interferometer means, comprising:

A process of illuminating a desensitization interferometer means to have related equivalent wavelength longer than the light source related wavelength with a light source which has related wavelength in order to obtain said desensitization interference fringe.

Any cross protection is restricted within the limits of equivalent coherence length, In order to supply a variate including a signal about equivalent wavelength modulated by signal envelope which consists of a signal corresponding to said interference fringe, and an envelope corresponding to the striped contrast. A process of generating measurement data corresponding to at least one pixel in a view of a desensitization interferometer means by displacing an object to a desensitization interferometer means.

A process of analyzing measurement data in order to determine surface height corresponding to each pixel.

[Claim 2]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 1, wherein said measurement data generation process includes a process of changing an interference figure to a pixel array.

[Claim 3]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 2, wherein said converting process includes a process of changing an interference figure by a camera means which consists of an optical detection array.

[Claim 4]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 2, wherein said analysis process includes a process of analyzing measurement data by a computer means.

[Claim 5]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 1, wherein said analysis process includes a process of analyzing measurement data by a computer means.

[Claim 6]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 1, wherein said measurement data generation process includes a process of providing a known scanning position where said striped contrast becomes the minimum in order to provide a measure of relative height of a surface point with an object surface.

[Claim 7]Said measurement data generation process includes further a process of changing an

interference figure into a spatial frequency domain, An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 1, wherein said analysis process includes a process of investigating a phase of a conversion interference figure as a function of spatial frequency in order to obtain surface height to each point on an object surface.

[Claim 8]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 7, wherein said converting process includes a process of changing an interference figure into a spatial frequency band by a Fourier analysis.

[Claim 9]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 1, wherein said lighting process includes a process of illuminating a desensitization interferometer means by a laser light source.

[Claim 10]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 1, wherein said lighting process includes a process of illuminating a desensitization interferometer means in a source of a candescent light bulb.

[Claim 11]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 1, wherein said lighting process includes a process of illuminating a desensitization interferometer means with a light emitting diode light source.

[Claim 12]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 1, wherein said lighting process includes a process of providing a high contrast desensitization interference fringe of depth within the limits which consists of equivalent coherence length.

[Claim 13]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 1, wherein said measurement data generation process includes a process of carrying out an objective depth scan in order to provide a variate of intensity as a function of a scanning position.

[Claim 14]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 13, wherein said depth scanning process includes a process which displaces an object in the vertical direction substantially [surface / which was illuminated by desensitization interference means].

[Claim 15]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 14, wherein said measurement data creating means includes further a process of performing two or more intensity measurement between depth scans which an object followed in order to provide an interferogram array to one of each of the pixel.

[Claim 16]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 13, wherein said measurement data creating means includes further a process of performing two or more intensity measurement between depth scans which an object followed in order to provide an interferogram array to one of each of the pixel.

[Claim 17]The ranges of said equivalent coherence length are following formula $|p+z-z_0| \leq L/2$... (1)

An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 1 being a depth range determined by (equivalent coherence length and p change with partial surface height on an object surface, z changes by a constant, p changes in a position on an object surface, and a scanning position and z_0 include an object surface-shaped measure among a formula, as for L).

[Claim 18]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 1, wherein said measurement data generation process includes a process of

only a known quantity displacing an object to a desensitization interferometer means, and recording optical detection data by an electronic storage means almost simultaneous.

[Claim 19]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 18, wherein said measurement data generation process includes further a process of changing an interference figure to a pixel array in order to supply said optical detection data.

[Claim 20]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 18, wherein said suitable work distance is larger than the depth of structure on an object surface.

[Claim 21]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 1, wherein said signal consists of an abbreviated vibration signal.

[Claim 22]An object surface shape measurement method using the large equivalent wavelength according to claim 18, wherein said signal consists of an abbreviated vibration signal.

[Claim 23]An optical shape measuring system characterized by comprising the following for measuring the shape of objective surface type.

An illumination method which has related wavelength.

Are installed to an illumination method so that it may be illuminated by said illumination method, and it illuminates by an incidence angle which is moreover different in an object with two or more beams of light at the almost same place, A desensitization interferometer means which can produce an interference fringe of high contrast within a range which has related equivalent wavelength longer than related wavelength of an illumination method, is installed in a suitable work distance to an object, and is defined by equivalent coherence length.

A detection means to be installed to said interferometer means and to detect an interference figure.

Carry an object and any cross protection is restricted within the limits of equivalent coherence length, Since a variate of intensity including a signal about equivalent wavelength modulated by signal envelope which consists of a signal corresponding to an interference fringe and an envelope corresponding to the striped contrast is provided as a function of a scanning position. A scanning means installed in order to displace the object about the surface illuminated by an interferometer means in order to perform a depth scan, A detection means to detect an intensity variate in order to provide one interferogram about at least one pixel in a view of a form measuring apparatus, and a means to provide surface height of an object surface corresponding to at least one pixel.

[Claim 24]An object surface shape measuring system characterized by comprising the following using the large equivalent wavelength according to claim 23.

A means by which said detection means provides one interferogram about each pixel within a view.

A means by which said surface height providing means provides surface height about each pixel.

[Claim 25]An object surface shape measuring system using the large equivalent wavelength according to claim 23 performing two or more intensity measurement while said scanning means is provided with a means to perform a depth scan which an object followed and said detection means performs an objective continuation depth scan.

[Claim 26]An object surface shape measuring system using the large equivalent wavelength according to claim 25 providing surface height from an interferogram with which said detection

means was further provided with a memory measure for memorizing a detected interferogram, and said surface height providing means was remembered to be.

[Claim 27]The ranges of said equivalent coherence length are following formula $|p+z-z_0| \leq L/2$... (1)

the inside of a formula, and L -- equivalent coherence length and p -- partial surface height on an object surface. z -- a scanning position and z_0 -- a constant -- p changes with the positions on an object surface by this -- an object surface-shaped measure -- containing -- an object surface shape measuring system using the large equivalent wavelength according to claim 23 by which being decided.

[Claim 28]An object surface shape measuring system using the large equivalent wavelength according to claim 23, wherein said illumination method consists of a spatial un-coherent illumination light source.

[Claim 29]An object surface shape measuring system using the large equivalent wavelength according to claim 23, wherein said illumination method consists of laser.

[Claim 30]An object surface shape measuring system using the large equivalent wavelength according to claim 23, wherein said illumination method consists of filament lamps.

[Claim 31]An object surface shape measuring system using the large equivalent wavelength according to claim 23, wherein said illumination method consists of light emitting diode means.

[Claim 32]An object surface shape measuring system using the large equivalent wavelength according to claim 23, wherein said signal consists of an abbreviated vibration signal.

[Claim 33]An object surface shape measuring system characterized by comprising the following using the large equivalent wavelength according to claim 23.

Said detection means is a light detecting means.

A means by which only a known quantity displaces an object to an interferometer means, and said scanning means detects an intensity variate by a light detecting means almost simultaneous.

[Translation done.]

* NOTICES *

JPO and INPIT are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention]Especially this invention relates to an optical non-contact surface type-like measuring method, concerning a surface image pick-up and the precision metrology for analysis as a whole.

[0002]

[Description of the Prior Art]The common problem in processing is precise surface type-like measurement. As an example of the item of the product which needs metrology, the plastic surface and the mechanical pump surface which carried out the element of an engine part and a magnetic storage device, a flat-panel display, and wood-graining shaping, a seal, and the cast coin are raised. For efficient production, the quality control automated in industrial environment at high speed is called for.

[0003]Although the most ordinary measurement tool for surface type-like measurement is a mechanical stylus (styli), only the information restricted dramatically at a low speed is acquired, but it has a possibility of damaging an object surface. The automation system usually known as coordinate measurement machinery is expensive, and a low speed.

It is used as a quality control on the work line (inch-line) which usually continued for the quality control (off line) outside a work line.

Accuracy is low and a mechanical gauge like a micrometer or a caliper cannot obtain a surface type-like profile. Therefore, precise processing is expected dramatically to provide a non-contact optical object form measuring means at the high speed which can be used out of a work line also in a work line top. Such a means should be applicable to a various object size and surface type-like jump surface organization. The automation part operation in industrial environment and collaboration are possible for such a means, and it should not receive influence in vibration.

[0004]According to the advanced technology, some are provided for the optical measurement art by geometric optics. A typical example is moire pattern analysis. This art is the 2nd edition of "an optical shop examination" of books, and daniell. It is indicated in detail [MARAKARA work (Wylie, New York, 1992)] in Chapter 16. The moire method is equivalent to geometric triangulation including projection and an image pick-up of Ronchi grating (ronchi ruling) or the same periodical structure. The commercial item based on this principle is the check flat (Chek-flat) manufactured by the speed femme spit fire (Speedfam-Spitfire) product group (DEPUREN, IL). Although the moire can measure the shape of a coarse field, it is general very

low accuracy compared with a mechanical stylus gauge, and, in a certain case, does not function at all to a mirror plane. In a still more difficult thing, moire must be proofread to a geometrical error. This is dramatically troublesome when change of the depth of an object surface is large.

[0005] There are some metrology methods of having used optical interference measurement in the advanced technology, using the character as a wave of light, it is highly precise and the map of change of surface height can be drawn. The examples of a common interferometer are the 2nd edition of "an optical shop examination" of books, and daniell, for example. It has appeared in Chapter 1 of MARAKARA work (Wylie, New York, 1992). Many of these conventional-type interferometer means cannot catch well a surface characteristic with a discontinuous height change in which $1/4$ of the wavelength (a commercial device usually 0.63 micrometer) of a light source is exceeded, or surface roughness. Therefore, a discontinuous larger surface characteristic than 0.16 micrometer brings about the ambiguity of an interference phase that it is difficult to interpret or impossible. Difficulty produces further a surface slope being too large, and resolving or distinguishing an interference fringe. As a result, it is thought to many processing metrology problems that an interferometer is not suitable.

[0006] Since the scope is restricted, the conventional interferometer is the advanced technology and is provided with some the alternative interference measurement methods and means which can respond to the big change in a split face and the shape of surface type. One clear method is indicated by the paper "split-face interference measurement using a carbon-dioxide-gas-laser light source" (applied optics 7 (9) 1858-1859 (1968)) according [the illustration method and device which are making the wavelength of light increase using a special light source] to C.R. manna phosphorus and M. ratter. However, such a method needs a special light source, an optical part, and a detection part, is generally dramatically expensive, and troublesome. Even if it compares and is such an expensive long wavelength interferometer, it does not function under nonsequential change of the shape of surface type exceeding $1/4$ of the long wave length.

[0007] As approach from another advanced technology for conquering the range to which the conventional interferometer was restricted, by R. RUNEBUNUWA. Use of the paper "application of interference phenomenon in metrology assay" physics magazine 3 (7) and multiple wave length who was described for the first time in 57-68 (1898) is raised. Very large equivalent wavelength is obtained by a series of measurement in two or more wavelength, and some of problems of the ambiguity of the conventional single wavelength interferometer can be conquered. The method of applying this art to surface metrology is indicated by U.S. Pat. No. 4,355,899 "interference measurement range measurement method" to T.A. NASUMAIA. However, even if it is such multiple wave length art, when it becomes difficult for a surface slope to be too large, or for granularity to be too large and to resolve an interference fringe, it does not function correctly. A multiple wave length interferometer is dramatically influenced by vibration again.

[0008] According to the advanced technology, the alternative interference measurement method of shoes of liking to plan to reduce the sensitometry to surface roughness and a surface slope is provided by using the measurement structure which is not usually used. The desensitization interferometer of the typical advanced technology U.S. Pat. No. 4,325,637 "phase adjustment of grazing incidence" and C. Jonathan of R.C. Moore, B. The paper by FURANTSUE and H.J. tee TSUIANI "oblique incidence and observation electronic speckle pattern interferometer" (the applied optics 33 (31), 7307-7311, and skew-ratio lighting that is

indicated by (1994) are used.) In what is called these grazing incidence interferometers, the striped density in an object surface can be reduced according to the angle of lighting and observation being slanting compared with the interferometer of the more common gestalt. This reduced striped density is equivalent to the long equivalent wavelength λ numbers of times from the actual wavelength λ of light. As the equivalent wavelength λ is large, the grade of the surface roughness which can be caught with a measuring device becomes larger. However, the large degree of lighting angle is needed to normal line direction incidence by significant reduction of sensitivity. With such a big angle, a problem arises about objective suitable lighting and image formation. There may also be a problem of the shade and shadow by the surface characteristic of a level difference or a slot which are not desirable. In the system of such advanced technology, in order to compensate various surface reflectance, there is the necessity of maintaining the suitable balance of the reference beam of an interferometer and an object beam, and new complexity arises. Furthermore, the grazing incidence interferometer cannot catch the surface characteristic which has the discontinuous height change exceeding $1/4$ of the equivalent wavelength λ .

[0009] Another geometrical approach which generates an interference pattern with long equivalent wavelength is dividing illuminant light into two beams and illuminating the same surface portion by a different incidence angle. As for the interference pattern which will be obtained if these beams (bundle of rays) recombine, it has much low sensitivity to change of surface shape. This reduced striped density is characterized by equivalent wavelength $\lambda > \lambda$ again. However, this method does not necessarily need the extreme angle at the time of illuminating, but it also has the advantage that the intensity of an interference beam can be balanced. The lighting which differed in order to realize long equivalent wavelength, and the device using the angle of observation express with a name called a desensitization interferometer in this indication.

[0010] The advanced technology provides some examples of a desensitization interferometer. W. In the paper "surface optical border-line mapping" (the applied optics 12 (7), 1552-1557 (1973)) by IERISSHU and G. McCosh, the desensitization interferometer using the diffraction grating set so that a test-report side might almost be touched is indicated. With the lighting of the lattice by a monochromatic plane wave, some beams corresponding to the different order of diffraction arise. These beams are reflected from an object surface, a lattice recombines, and the fringe patterns similar to the surface outline line of the object surface are obtained. Another advanced technology using the optical beam of a different angle in lighting, P. Jaco, X. Colonna It describes in DOREGA and the paper "common way interferometer for a surface smoothness examination" by P.M. Boone, and (the optics for the productivity in SPIE 2248 and manufacture and the paper 18 (1994)). This device operates by the interaction of the two orders of diffraction of the holographic recording of a spherical wave front.

[0011] Although they have some advantages, since the method of IERISSHU and McCosh, and Jaco and the other methods do not set up a suitable work distance, they are not suitable for automatic optical checking. These methods need to lay a diffraction element so that both may almost contact an object surface. This is because a single diffraction element divides illuminant light into two or more beams in both method of these, it **** in the direction from which two or more of those beams are different and the portion with same object surface is not illuminated. Therefore, in particular, in the coarse surface, the two beams are not appropriately oriented so that desired cross protection may be generated. Only one method of avoiding this problem is bringing an object immediately near the surface of a diffraction element. The work distance

defined as a distance of an object and which element of an interferometer is usually smaller than 100 micrometers in these systems. In the inspection needs in many manufacturing processes, this is too small a distance.

[0012]According to the some advanced-technology type desensitization interferometer using the lighting from two angles, there is no necessity of saying an object that it makes the element of an interferometer almost contacting. The typical example is taught to U.S. Pat. No. 3,958,884 to F.H. Smith. Smith is teaching some division of illuminant light and the methods of recombination using the combination of a refraction ingredient and a polarization component so that work distance may become large. These methods include use of the Jamin interferometer, a double reflex doublet, double reflex doublet prism, or a savart doublet plate. Another example of the desensitization interferometer of having a big work distance is provided by U.S. Pat. No. 4,498,771 "the surface type-like interference measurement method, and means" (3:37 - 4:16) to G. McCosh. The device indicated by McCosh leads an optical beam to an object using a doubly refracting crystal like a WORATTOSOMPU rhythm, and a mirror system.

[0013]The demerit of a desensitization interferometer when it uses with broadband illumination or diffused lighting is that useful measurement depth is restricted by the coherence of light. If it explains directly, "coherence" here will refer to the capability of the light source which generates an interference fringe, when light is divided into two portions and recombines. Generally, striped quality or contrast decreases according to the optical path difference which two beams pass. It is only a time of deciding an objective position precisely that the optical path difference of the beam in which it interferes is about equal to zero that an un-coherent light source generates the stripes of high contrast. Operation of the desensitization interferometer which has an un-coherent light source is similar to operation of the white light interference meter of a conventional type like a MIRA micro object lens.

A point of difference is that the size of cross protection is expanded.

The term of "white light" points out here any of the lighting having big spectrum distribution they are, when compared with the light source of monochromatic light radiation laser, low-pressure arc light, and substantially [others]. I hear that a striped pattern appears only in the portion of the object which enters within limits with the small depth in alignment with the optic axis of the interferometer, and the practical result is in it, when a light source is un-coherent. The range of this depth is about several times the equivalent wavelength, and is the depth which is too small to manufactured various big objects.

[0014]The some advanced-technology type desensitization interferometer using the lighting from two angles is not influenced by the wavelength of a light source, therefore functions well by white light. Simultaneous pendency U.S. patent application 08th / No. 334939, and the 08/365 which applied for one of such the systems on November 7, 1994 and December 28, 1994, respectively It is indicated by "the object form measuring method and device" using diffracted-light study of No. 589. By using the combination of two or more diffraction elements, the device indicated to above-mentioned simultaneous pending patent application (among those, ** takes the all in as a part of this invention specifically by quotation here) projects a measuring plane on a suitable work distance. The desirable embodiment taught by these applications has the equivalent wavelength λ for which it does not depend on the light source wavelength λ substantially. Therefore, various light sources including a white light source can be used. However, when the light source is expanded, namely, when it has a big emission face product, therefore an un-coherent beam is emitted spatially, a striped pattern appears only in the portion of the object which enters within limits with the small depth in alignment with the optic

axis of the interferometer. The range of this depth is also about several times the equivalent wavelength, and is the depth which is similarly too small to manufacture various big objects.

[0015] If an object surface is coarse, the general difficult point about all the desensitization interferometers using the beam of a different incidence angle exists. The striped pattern of the quality of an excellent article is obtained, only when completely coherent and two beams collide with the surface substantially in metaphor illuminant light in the coarse surface at the same place. Therefore, when an object surface is coarse, it can measure only in the range of the small depth in alignment with the optic axis of the interferometer. This characteristic of all the interferometers desensitized geometrically restricts that usefulness severely.

[0016] It can conclude that the desensitization interferometer of the advanced technology has many advantages from these observation to a certain measuring work which becomes easy with long equivalent wavelength. However, there are many restrictions in the capability to catch the manufacture part which has a big change in the shape of surface type. All of the desensitization interferometer described here do not have the capability to measure an object with the discontinuous surface features or average surface roughness exceeding $1/4$ of equivalent wavelength.

[0017] The thing based on an instrumental scan mechanism (mechanical scanning mechanism) and the conventional interferometer which operates by white light is raised as one certain completely different interferometric measurement art for surface type-like measurement. This art is referred to as a scanning white light interference meter or SWLI in the indication of this invention. The typical method for three-dimensional measurement of the shape of surface type using SWLI is indicated by U.S. Pat. No. 4,340,306 to N. ballast BURAMEINIAN. This patent has indicated the white light interference meter provided with the reference mirror scanned mechanically, and a two-dimensional detection child array and a computer control system. The indicated method includes scanning either a reference mirror or an object with a discrete disposal method, measuring the striped contrast of each pixel for every scanning position, doing in this way, and determining the position of the maximum striped contrast to each surface point. The scanning position whose contrast is the maximum is a measure of the relative height of a specific surface point. The method of SWLI taught by ballast BURAMEINIAN is suitable for some mirror planes [like] which are optical elements.

[0018] U.S. the 08/014 to which it applied for SWLI art of the advanced technology with one [another] more on September 9, 1994 It is taught to the simultaneous pendency U.S. patent application of a name called "the method and device" for the surface type-like measurement by the spatial frequency analysis of an interferogram of No. 707. The optical system for measuring the shape of the object by this indication consists of an interferometer provided with a multicolor light source or the white light source, the instrumental scan device, the two-dimensional detection child array, and the digital signal processing means that measures surface height from interference data. By scanning an object in the direction about vertical to the surface illuminated by the interferometer, the interferogram to each image point within a view is generated simultaneously, and detection child data is recorded on a digital memory in that case. These interferograms are changed into a spatial frequency domain by a Fourier analysis next, and when the surface height of each point investigates a complex phase as a function of spatial frequency, they are obtained. A culmination is generation of the perfect three-dimensional picture which comprised height data and corresponding image plane coordinates.

[0019] To a certain kind of an object and the surface, although the various methods and means

of SWLI of the advanced technology are useful, they have demerit that they are important and fundamental. For example, as compared with that a view is narrow, that the sensitivity to change of object reflectance is high, and the gestalt of optical surface measurement of other many, it is raised that measuring time is late, that the sensitivity to vibration is high, etc. These restrictions relate to the wavelength and the corresponding striped density of light.

[0020]Generally as one of the most important and fundamental demerits of SWLI of the advanced technology, it is raised that a view is a size of the grade caught with a standard microscope object lens. In order to function correctly, the detection child who records interference data electronically in a SWLI device has to have resolution high enough as compared with interference fringe density. When the view of the SWLI device of the advanced technology increases, striped density becomes a value which is too high for resolving easily. This is remarkable when treating a split face. The inclination admissibility to a mirror plane decreases linearly with view size, and the speckle effect required for split-face measurement has definition, only when the numerical aperture (NA) of an object lens decreases linearly with increase of a view. Since the amount of condensing decreases by square [of NA], it is very a disappointment that it is necessary to resolve a speckle pattern from a split face. That there is a loss of light means that so powerful an illuminator is needed, if surface area becomes large. What is worse, striped contrast is a parameter changed very easily, and measurement quality is deterministically dependent on the balance between a reference beam and object beam strength.

[0021]Since it is difficult to measure big surface area, the only commercial device based on SWLI is a microscope, and can incorporate the circular view that a diameter is usually smaller than 5 mm. The new view (NewView) 100 according to the ZYGO (Zygo) corporation for example as the device, RST by a WYKO corporation (Tucson, Arizona), Mike Loki Sam (MICROXAM)-EX by a phase shift technology company (Tucson, Arizona), the 512 optical profile and form tester on the micro map (MicroMap) (Tucson, Arizona), etc. are raised. Therefore, in spite of needing the measurement tool for manufacture for a real target, the advanced technology does not provide the SWLI device used for things other than a microscope part article (Microscopic parts).

[0022]Another fundamental fault of the SWLI art in the advanced technology is that data acquisition is very late. For example, RST manufactured by WYKO Corporation acquires data at a rate with a surface depth of 0.5 micron/s. Therefore, since the surface which has 1 mm of surface features scans, it takes 30 minutes or more. It is a result of the cross protection changed at high speed as a function of a scanning position that speed is slow. In order to perform exact measurement, it is necessary to record these change in detail. Usually, this becomes the rate of measuring once for 75 nm of every scanning operation per pixel. That speed is slow brings about further the high sensitivity and thermal deformation to vibration, and which mechanical distorted problem during measurement.

[0023]Another fundamental fault of SWLI is the high sensitivity to vibration, the sensitivity of an interference fringe pattern is very high, and a little mere vibration also originates in breaking easily that this has a slow data acquisition speed to one, and one. A SWLI device needs a usually big fixture and an expensive oscillating breaker. A SWLI device is relatively restricted very much to quiet environment compared with an ordinary production environment in preventive measures like this.

[0024]Since it is pressed for the produced parts by the necessity of measuring with a large area at high speed, efforts to extend the scope of SWLI have been partly paid in the advanced

technology. for example, "a three-dimensional image pick-up by the subnyquist sampling (sampling) of a white light interferogram" (the optical communication 18 (17).) by P.deGroot and L.Deck In order to improve the speed of data acquisition and for this to improve the depth field of a device, sparse (sparse) data-samples-ization is used for the method currently taught to the paper of a title called 1462-1464 (1993). Nevertheless, even if it carries out with this sparse data-samples-izing, the approach by SWLI is a low speed fundamentally because of the necessity of sampling a high-density interference fringe pattern correctly. The trial of another advanced technology to which the reading per second in a SWLI microscope is made to increase is indicated by U.S. Pat. No. 5,402,234 "method for high-speed acquisition of the data in coherence scanning interference measurement, and device" owned [of the March 28, 1995 issue by L. deck]. The special algorithm and data buffer which select and memorize the most useful portion of an interferogram about each pixel are used for the system indicated by the deck. According to this method, the quantity of data processing required to generate a three-dimensional picture decreases substantially. The principle taught by the deck is taken in by the product of the new view (NewView) 100 manufactured by the ZYGO (Zygo) corporation (Connecticut, middle field). However, the new view 100 also still needs the exact data sample of a high-density interference fringe pattern. Therefore, a reading per second is still dramatically slow, and acquires data at a rate with a surface depth of 2 microns per second which left.

[0025]The trial of another advanced technology to which useful application of SWLI is made to increase is described in the paper "three-dimensional perception of the split face by a coherence radar" (the applied optics 31 (7), 919-925 (1992)) by T. DOREZERU, G. Heusler, and H. BENTSUKE. The numerical aperture (NA) in which the regulation for increasing the average speckle size from the coarse large surface is possible, and a special combination of two mechanical actuators are used for the optical system of this indication. It is for displacing a reference mirror in the range with one [small] of the actuator, and is for another scanning an object by a discrete step. The picture (graphical images) of the three-dimensional object which contains an object with a larger diameter than 5 mm in some of drawings of the paper is shown. However, the practical value of a device is severely restricted for the light of a low to a big object, and the necessity of processing a lot of data. And the data acquisition procedure is not especially late suitable for a high-speed optical inspection.

[0026]Thus, the trial of the advanced technology to which useful application of SWLI is made to increase is packed as follows. The mechanical stylus is useful although surface features of a certain kind is measured, but it is dramatically late, and only the limited information is acquired, but there is a possibility of harming an object surface. Accuracy is not generally inferior to the device provided by the mechanical stylus in the optical apparatus of the advanced technology based on geometric optics, and it does not necessarily function to which type of surface. To very highly precise measurement of an optical element, although the interferometer of a conventional type is useful, it does not fit much manufacturing inspection work. Although the multiple wave length interferometer can solve the problem of some obscurities by the level difference and slot on a mirror plane, it is accompanied by the almost same restriction as a single wavelength interferometer about a surface slope and granularity. To the surface which can be seen very easily with big equivalent wavelength, although the desensitization interferometer is advantageous, the case of the surface accompanied by change of the big depth, and in the case of the surface accompanied by the discontinuous larger feature than $1/4$ of equivalent wavelength, it does not function well as compared with equivalent wavelength. Therefore, it is narrow and sensitive to change of surface reflectance, and the method of SWLI

has a dramatically late view and it is very sensitive to vibration.

[0027]Therefore, as for the advanced technology, such a means is not provided although the necessity of receiving the non-contact optical means which measures the object surface for precise manufacture is very high. The publicly known method of optical surface type-like measurement is not suitable for industrial environment, and its pliability (flexibility) over a surface size or shape, or a state is not enough, and it is not suitable for part (automated) operation in which it automated. Therefore, although it is [for precise surface type-like measurement] exact and a flexible (flexible) method and device are called for at high speed, it has not yet realized.

[0028]This application relates to simultaneous pendency U.S. application "method of measuring the shape of surface type using diffracted-light study, and device" (the [November 7, 1994 application] 08/334 the [No. 939 and / December 28, 1994 application] 08/365 No. 589), Although the contents of those applications are specifically made into the part of this invention by quotation here, it is improvement to them.

[0029]

[Means for Solving the Problem]A method of measuring shape of an object surface from a suitable work distance to an object using a desensitization interference fringe generated from a desensitization interferometer means whose this invention is characterized by that what provides an object surface shape measurement method which used large equivalent wavelength comprises the following.

A process of illuminating a desensitization interferometer means to have related equivalent wavelength longer than the light source related wavelength with a light source which has related wavelength in order to supply said desensitization interference fringe.

Any cross protection is restricted within the limits of equivalent coherence length, In order to supply a variate including a signal about equivalent wavelength modulated by signal envelope which consists of a signal corresponding to said interference fringe, and an envelope corresponding to the striped contrast. A process of generating measurement data corresponding to at least one pixel in a view of a desensitization interferometer means by displacing an object to a desensitization interferometer means.

A process of analyzing measurement data in order to determine surface height corresponding to each pixel.

[0030]An illumination method which other inventions are the optical shape measuring systems for measuring the shape of objective surface type, and has related wavelength, Are installed to an illumination method so that it may be illuminated by said illumination method, and it illuminates by an incidence angle which is moreover different in an object with two or more beams of light at the almost same place, A desensitization interferometer means which can produce an interference fringe of high contrast within a range which has related equivalent wavelength longer than related wavelength of an illumination method, is installed in a suitable work distance to an object, and is defined by equivalent coherence length, A detection means to be installed to said interferometer means and to detect an interference figure, and an object are carried, Any cross protection is restricted within the limits of equivalent coherence length, Since a variate of intensity including a signal about equivalent wavelength modulated by signal envelope which consists of a signal corresponding to an interference fringe and an envelope corresponding to the striped contrast is provided as a function of a scanning position. A detection means to detect an intensity variate in order to provide one interferogram about at

least one pixel in a scanning means installed in order to displace the object about the surface illuminated by an interferometer means in order to perform a depth scan, and a view of a form measuring apparatus, An object surface shape measuring system using large equivalent wavelength provided with a means to provide surface height of an object surface corresponding to at least one pixel is provided.

[0031]Using desensitization interference images, from a suitable work distance over an object, this invention is the shape of objective surface type a method and a system to measure, and this optical shape measuring system, A light source (illumination method) which consists of a filament lamp, a light emitting diode, or laser, It comprises a desensitization interferometer with the feature of equivalent wavelength far longer than wavelength of illuminant light, an instrumental scan system (scanning means) which consists of optical stages, an electronic detection means which consists of a camera provided with CCD or a photograph array, and a data processing means which consists of computers.

[0032]An optical surface type-like measuring device which consists of a desensitization interferometer illuminated with a light source like a filament lamp, a light emitting diode, or laser, for example by this invention can be provided. A desensitization interferometer is characterized with the larger equivalent wavelength λ than the light source wavelength λ , a suitable work distance (for example, larger than 1 mm) over an object, and the capability to generate an interference fringe of high contrast in the depth range L defined as equivalent coherence length. An interference fringe is changed into an electrical signal to an array of a pixel by camera provided with a photograph detection child's array.

[0033]Measurement data to one or more picture dots, i.e., a pixel, in a view of a desensitization interferometer is the intensity fluctuation as a function of a scanning position at the time of only a certain known distance displacing an object to a desensitization interferometer by computer. Measurement data (photograph detection child data) which detected this intensity fluctuation by an electronic detection means (camera) as measurement data, and was detected simultaneously is generable by recording *****. Intensity fluctuation as a function of a scanning position is expressed as a vibration signal about the equivalent wavelength λ modulated by a signal envelope (envelope) which restricts cross protection to a range within equivalent coherence length L . A vibration signal corresponds to an interference fringe and an envelope of a vibration signal is striped contrast.

[0034]Next, measurement data is analyzed by computer and surface height corresponding to each pixel is calculated. For example, in a method of this invention, a scanning position where striped contrast becomes the maximum is a measure of relative height of a certain surface point. Or according to the one more option of this invention, by changing an interferogram into a spatial frequency domain by a Fourier analysis, and investigating a complex phase as a function of spatial frequency, surface height to each pixel is obtained and the shape of surface type is measured again.

[0035]This invention conquers range restrictions of a desensitization interferometer by advanced technology, and provides a view far larger simultaneously than a scanning white light interference meter by which advanced technology, and a high scan speed. These of this invention and other features will become further clear by setting and reading the following detailed description and an attached drawing.

[0036]

[Embodiment of the Invention]Hereafter, based on the example shown in a figure, this invention is explained in full detail. This invention is not limited by this. Using a desensitization

interference fringe, this invention is the method and system which measure object surface shape from a suitable work distance optically to an object, and this system, A light source and the desensitization interferometer which generates the desensitization interference fringe which has equivalent wavelength far longer than the wavelength of illuminant light, After memorizing and analyzing in a memory the measurement data detected as the instrumental scan mechanism in which an object is displaced to a desensitization interferometer, and an electronic detection means to detect a desensitization interference fringe as measurement data of one or more pixels, it comprises a data processing means which consists of a computer changed into the surface height of each pixel. As measurement data about one or more the picture dots, i.e., the pixel, in the view of an interferometer, an object is displaced to an interferometer by an instrumental scan mechanism, the intensity fluctuation as a function of a scanning position is detected by an electronic detection means, and it is generated by recording on the electronic storage (memory) of a computer. It can become irregular by the signal envelope which restricts cross protection to the range within equivalent coherence length, and the intensity fluctuation as a function of a scanning position can be expressed as a signal about equivalent wavelength which vibrates mostly. The signal of this vibratility corresponds to an interference fringe, and an envelope is striped contrast. The array (pattern) of an interferogram (change of interference light intensity, striped contrast) is analyzed by computer at the following step, and the surface height corresponding to each pixel is calculated. At this time, an interferogram is changed into a spatial frequency domain by a Fourier analysis, by investigating the complex phase as a function of spatial frequency, determines the surface height of each pixel and measures the shape of objective surface type.

[0037]Drawing 1 is an explanatory view showing the basic constitution in the method and system of this invention, and shows the desirable embodiment of the optical surface shape measuring system of an invention assembled in order to measure the shape of surface type of the object 20. In drawing 1, the illumination light is supplied with the light source 30, and a filament lamp, a light emitting diode, laser with a diffusing element, and the same spatially un-coherent light source for lighting are raised as a light source. As for the interferometer 50, although the optical beam 40 is led to the interferometer 50, it is desirable that it is the desensitized interferometer. Although the interferometer 50 illuminates an object with the beam 60, this beam may consist of two or more beams (not shown) which illuminate an object by an incidence angle which is substantially different at the same place. The capability to generate the interference fringe of high contrast in the range L defined as a desirable special feature of the interferometer 50 here as a suitable work distance (for example, larger than 1 mm) and equivalent coherence length with the larger equivalent wavelength λ than the light source wavelength λ and the object 20 is achieved. As for the interferometer 50, it is desirable to project the interference fringe showing an object surface on the electronic detector 80 by the beam 70. As an electronic detector, a closed circuit television camera, a linear shape detection child array, a single element detection child, etc. are raised here, for example.

[0038]It is desirable to lay the object 20 on the instrumental scan stage 90 arranged in order to displace the object 20 in the direction substantially vertical to the surface illuminated by an interferometer. Displacement of the object 20 by the stage 90 is called a depth scan (vertical scanning) here. As for the stage 90, being controlled by the computer 100 is desirable. In the desirable method of this invention, when carrying out the depth scan of the object 20 continuously, two or more intensity measurement is performed by the electronic detector 80. As for these measurement results, it is desirable to make it memorize in the dynamic memory

(not shown) of the computer 100. Thus, as for the obtained data, it is desirable to make it memorize in a digital format as an array of an interferogram, and one interferogram corresponds at a time to each picture dot or pixel within the view of a device as a thing showing change of the intensity as a function of a scanning position.

[0039] Typical change of the measured intensity as a function of the depth to one pixel is shown in drawing 2. Usually, as for the periodic pulsing called an interference fringe, it is desirable to fall within the depth range expressed with a following formula.

$$|p+z-z_0| \leq L/2 \quad \dots (1)$$

L is equivalent coherence length, p is partial surface height here, z is a scanning position and z_0 is a constant. As for the value of p , changing with the positions on an object surface is usually desirable, and it is an object surface-shaped (object surface topography) measure. By scanning an object over the wide range, it is desirable to collect interferograms about all the surface points.

[0040] For example, the analyzing method of an interferogram as shown in drawing 2 is publicly known in this technical field partly. It is because the easiest method measures the intensity of the vibration signal in the interferogram as a function of a scanning position. A signal is the strongest at the time of $p=z_0-z$. Therefore, signal strength directs surface height p to each pixel. By this method, even if it is change beyond the range of effective coherence length L , the thing in object surface shape for which a big change is measured very much becomes possible. According to the principle currently taught to U.S. patent application 08th of the September 9, 1994 application under simultaneous pendency / No. 014 or 707 "method for the surface type-like measurement by the spatial frequency analysis of an interferogram, and device", analysis can also be advanced by frequency analysis. Let the contents of this application be a part of this invention by quotation.

[0041] Therefore, the data acquisition which is rich in these originality, and an analyzing method are similar to the procedure in which it was used for the SWLI method of precedence. However, since the interferogram of the device which is rich in this originality is rather characterized with the equivalent wavelength λ from the light source wavelength λ , compared with the advanced technology, only factor λ/λ of number of required data points has decreased for predetermined scanning length. Furthermore, the electronic detection means can analyze an interference fringe easily [possible / whether it stretches more] by the interference figure characterized with the optical wavelength λ . Therefore, compared with the advanced technology, a measuring-plane product can be increased substantially.

[0042] Although various examples currently indicated here show what operates using an un-coherent light source, if it is sufficient split face for an object surface to weaken the spatial coherence of catoptric light substantially, even if it uses a coherent light spatially, the purpose of this invention can be attained. The required thing is that an interferometer has the feature equivalent coherence length L which is not too large. $:\lambda \leq L \leq 30\lambda$ as which the typical range of useful equivalent coherence length is determined by a following formula by a publicly known data analysis method now (2)

However, the value of L except [this] not deviating from the intention of this invention is also possible.

[0043] Although one example incorporating the desensitized type interferometer of the form special to drawing 3 of this invention desirable now is shown, This is the 08/334 of the application as of November 7, 1994. The 08/365 of No. 939 and the application as of December 28, 1994 It is based on instruction of the simultaneous pendency U.S. patent application

"method of measuring the shape of surface type using diffraction optics, and device" of mine of No. 589. According to the method of this invention using this device, the light from the light source 30 is collimated by the illumination light 140 with the lens 35. The beam of light 140 strikes upon the concave grating 120 first. A concave grating divides the beam of light 140 into the beam of light 150 and the beam of light 160. Diffraction of the beams of light 150 and 160 is carried out by the second concave grating 130 at the following step, and then it hits the object 20. If it reflects, these beams of light will get across to the concave grating 130 again.

Diffraction of the concave grating 130 is carried out so that these beams of light may be re-compounded on the surface of the concave grating 120. Diffraction of the re-compounded beam of light is carried out to the exit light line 180 common to the next, and it is doubled in a focus on the camera 50. The interference figure which expresses the difference of the optical path length of the beams of light 150 and 160 on a camera is detected.

[0044]The perpendicular displacement of the object 20 produces change of measured intensity as a function of the depth as a result of a difference of the incidence angle of the beams of light 150 and 160. what showed drawing 2 change of the intensity measured about 1 pixel of a picture as a function of a scanning position -- ** -- it is the same, therefore characterizes by the equivalent wavelength λ and equivalent coherence length L . $\lambda = \lambda / (\cos(\theta) - \cos(\phi))$... (3)

(The incidence angle of the inside of a formula and the beam of light [as opposed to the surface 170 of the object 20 in θ] 160 and ϕ are the incidence angles of the beam of light 150 to the surface 170 of the object 20). It turns out that it can make in principle when any owner wavelength $\lambda > \lambda$ chooses the suitable angles θ and ϕ . For example, it is $\lambda * 16.6\lambda$ if it is $\phi = 20$ degrees and $\theta = 0$ times.

[0045]Although equivalent coherence length L for the desirable example of drawing 3 is decided by many factors, it is mainly related to the irradiation surface product of the uneven grade of the surface of the object 20, and the light source 30. Therefore, if an irradiation surface product can be adjusted or the grade of the spatial coherence of a light source can generally be changed, the size of equivalent coherence length L can be adjusted according to application.

[0046]One example of this invention using the desensitized type interferometer of another form is shown in drawing 4. In the example shown in drawing 4, the light from the beam of light 230 is collimated by the beam of light 200 with the lens 235. The beam of light 200 is reflected with the reflector 205. The beam splitter 210 divides this light into the beam of light 240 and the beam of light 245. It reflects from the mirror 250 and the beam of light 240 is turned to the object 20 by the incidence angle ϕ . It reflects from the mirror 255 and the beam of light 245 is turned to the object 20 by the incidence angle θ . After reflecting from the object 20, it reflects from the mirrors 260 and 265, respectively, and then the beams of light 245 and 255 are re-compounded by the beam 275 by the beam splitter 270. The lens 285 connects the image of the object 20 on the camera 290. When it adjusts appropriately, an interference figure arises with various beam paths in the example shown in drawing 4, but the equivalent wavelength λ determined by the equation 3 decreases. When it adjusts appropriately, even if it uses an un-coherent light source, this interferometer operates. However, when an un-coherent light source is used with this example, the field of high striped contrast is restricted to equivalent coherence length L . Equivalent coherence length relates to the both sides of the bandwidth of the spectrum of a light source, and the size of a light source. The feature of others of the example shown in drawing 4, for example, data acquisition, and the analyzing method are substantially [as the above-mentioned this invention example] the same.

[0047] Another example of this invention using the desensitized type interferometer of another form is shown in drawing 5. In the example shown in drawing 5, the light from the light source 330 is collimated by the beam of light 300 with the lens 335. The beam of light 300 is mutually divided into the two right-angled beams of light 340 and beams of light 345 by the double refraction element 310. This double refraction element is like the optical component which separates spatially two polarization, a Wollaston prism or a beam of light. Both the lenses 350 connect the focus of the beams of light 340 and 345 on the object 20. After reflecting from the object 20, the beams of light 340 and 345 are emitted until it is collected with the lens 360 to which the focus of these beams of light is connected again. The double refraction element 370 re-compounds the beams of light 340 and 345, and makes them the beam of light 375. The light polarizer 380 compounds projection of the beam of light 340 and polarization of 345, carries out it to common polarization, and is placed in the direction which produces cross protection. The lens 385 connects an objective image on the camera 390 next. When it adjusts appropriately, various beam-of-light paths in the example shown in drawing 5 produce the interference figure showing object form, but the equivalent wavelength λ determined by the equation 3 decreases. If it adjusts appropriately, even if it uses an un-coherent light source, this interferometer will operate. However, when an un-coherent light source is used with this example, the field of high striped contrast is restricted to equivalent coherence length L . Equivalent coherence length relates to the both sides of the bandwidth of the spectrum of a light source, and the size of a light source. The example shown in drawing 5 is most suitable for the single point of the object 20, or the linear image. In the case of the image of a single point or linearity, probably, a horizontal scanning mechanism (not shown) is understood as including in the stage 90 having an advantage, in order to make easy composition of the perfect three-dimensional shape of the object 20. The feature of others of the example shown in drawing 5, for example, data acquisition, and the analyzing method are substantially [as the above-mentioned this invention example] the same.

[0048] If it is a person skilled in the art, it will be able to understand that the form or details of a method and a device indicated without deviating from the intention of this invention can be substituted, omitted and changed.

[0049]

[Effect of the Invention] According to this invention, the object surface shape measurement method and system using the interferometer which is rich in this originality do so the effect taken below. Both the coarse surface and the surface like a mirror can be measured. The surface with a big distortion or inclination can be measured. A view larger than the conventional SWLI art becomes possible. A high-speed scan is attained from the conventional SWLI art. The range of a depth scan (vertical scanning) is larger than the conventional desensitized type interferometer. Work distance is larger than the most conventional desensitized type interferometer. There is little influence of vibration compared with the most conventional desensitized type interferometer. Striped contrast profitable **** outstanding from both interference light lines reflecting from an object surface.

* NOTICES *

JPO and INPIT are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DESCRIPTION OF DRAWINGS

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1]It is a figure showing the basic constitution (components) in the method and system of this invention.

[Drawing 2]It is a graph which shows change of the measured intensity as a function of the scanning position to one pixel in a view.

[Drawing 3]It is a figure showing the desirable embodiment of this invention.

[Drawing 4]It is a figure showing another embodiment of this invention.

[Drawing 5]It is a figure showing another embodiment of this invention.

[Description of Notations]

20 Object

30 Light source

40 Optical beam

50 Interferometer

60 Optical beam

70 Optical beam

80 Photoelectrical detector

90 Stage

100 Computer

[Translation done.]

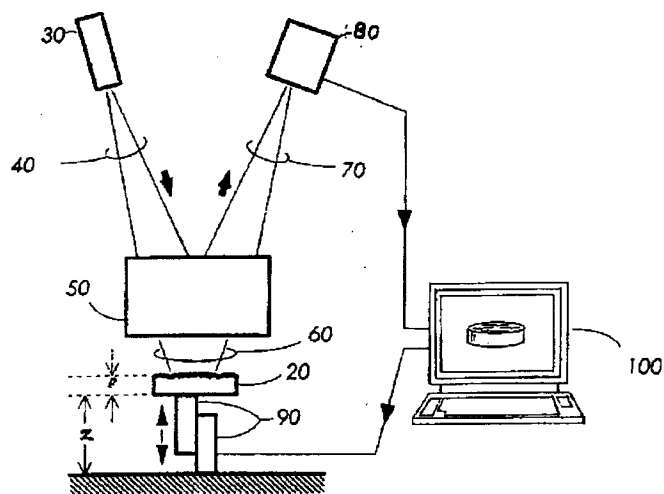
* NOTICES *

JP0 and INPIT are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

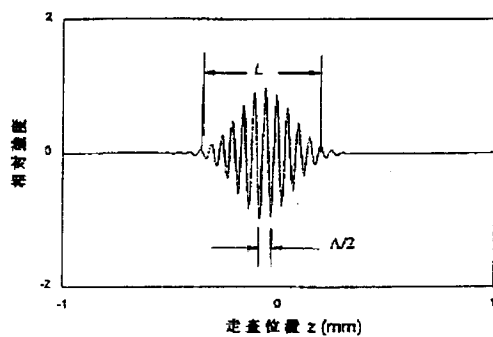
- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.*** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DRAWINGS

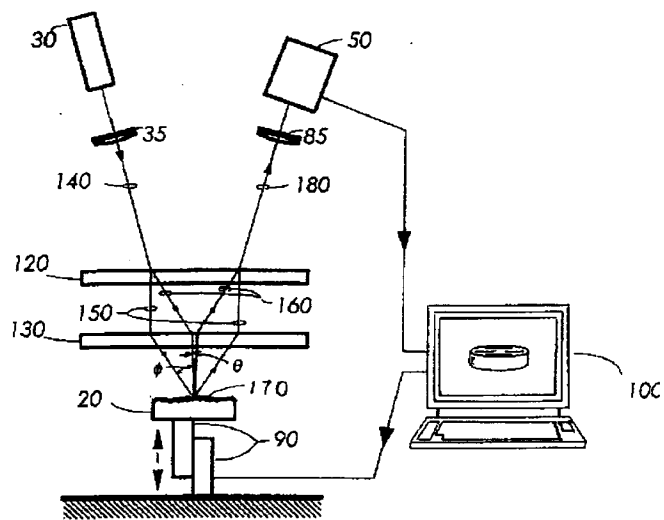
[Drawing 1]



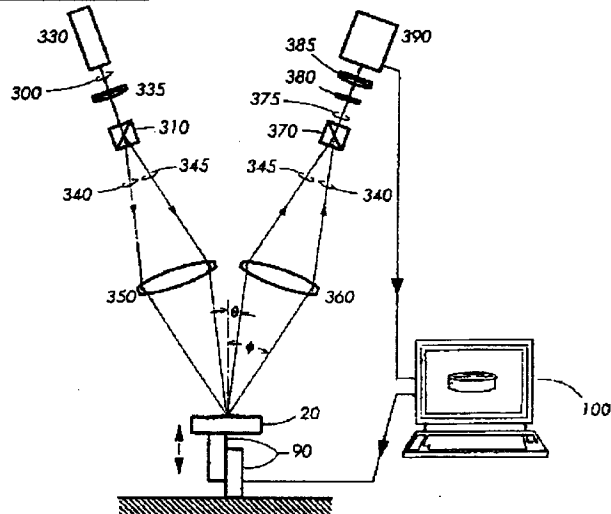
[Drawing 2]



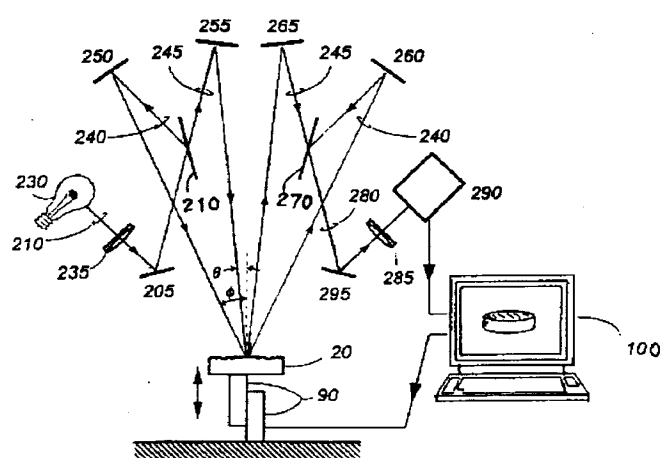
[Drawing 3]



[Drawing 4]



[Drawing 5]



(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平8-285561

(43)公開日 平成8年(1996)11月1日

(51)Int.Cl.⁶

G 0 1 B 11/30
9/02

識別記号

1 0 2

庁内整理番号

F I

G 0 1 B 11/30
9/02

技術表示箇所

1 0 2 B

審査請求 未請求 請求項の数33 O L (全 12 頁)

(21)出願番号 特願平8-24242

(22)出願日 平成8年(1996)2月9日

(31)優先権主張番号 08/417793

(32)優先日 1995年4月6日

(33)優先権主張国 米国 (U S)

(71)出願人 591102073

ジゴー コーポレーション

Z Y G O C O R P O R A T I O N

アメリカ合衆国 カネチカット州 06455

-0448、ミドルフィールド、ローレル プ

ルック ロード (番地なし)、ポスト

オフィス ボックス448

(72)発明者 ピータ デ グレート

アメリカ合衆国 カネチカット州 06457、

ミドルタウン、ローレル グROUP ロード

355

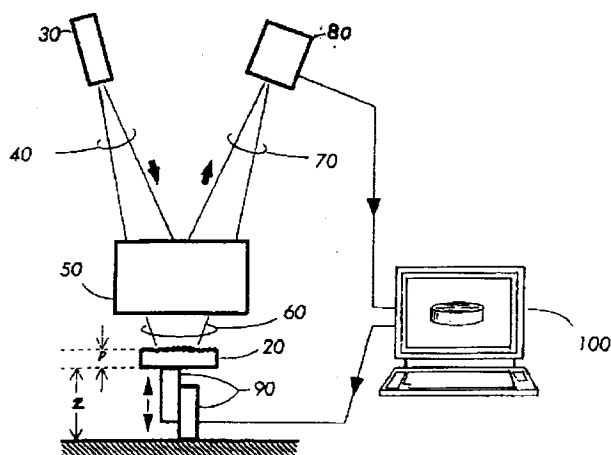
(74)代理人 弁理士 野河 信太郎

(54)【発明の名称】 大等価波長を用いた物体表面形状測定方法及びシステム

(57)【要約】

【課題】 従来の干渉計より遥かに広い視野と高速度で光学的に物体表面形状を測定する。

【解決手段】 減感干渉縞を用いて、物体に対して適切な作業距離から物体表面形状を光学的に測定する方法とシステムであり、このシステムは、光源と、光源光の波長よりはるかに長い等価波長を有する減感干渉縞を生成する減感干渉計と、物体を減感干渉計に対して変位させる走査機構と、減感干渉縞を1つ以上の画素の測定データとして検知する検知手段と、検知した測定データをメモリに記憶し解析した後各画素の表面高さに変換するコンピュータとで構成される。前記測定データは、物体を干渉計に対して変位させた際の走査位置の関数としての強度変動を示し、等価コヒーレンス長以内の範囲に干渉効果を制限する信号包絡線により変調した等価波長に関する振動性の信号として表される。この包絡線は縞明暗を示し、この縞明暗から各画素の表面高さを決定して表面形状を測定する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 減感干渉計手段から生成される減感干渉縞を用いて物体に対し適切な作業距離から物体表面の形状を測定する方法であって、
前記減感干渉縞を得るために関連波長を有する光源によってその光源関連波長より長い関連等価波長を有する減感干渉計手段を照明する工程と、
いかなる干渉効果も等価コヒーレンス長の範囲内に制限し、前記干渉縞に対応する信号とその縞コントラストに対応する包絡線とからなる信号包絡線によって変調された等価波長に関する信号を含む変量を供給するために減感干渉計手段に対し物体を変位させることにより減感干渉計手段の視野内の少なくとも 1 つの画素に対応する測定データを生成する工程と、
各画素に対応する表面高さを決定するために測定データを解析する工程とからなることを特徴とする大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 2】 前記測定データ生成工程は干渉模様を画素アレイに対し変換する工程を含むことを特徴とする請求項 1 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 3】 前記変換工程は光検知アレイからなるカメラ手段で干渉模様を変換する工程を含むことを特徴とする請求項 2 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 4】 前記解析工程はコンピュータ手段により測定データを解析する工程を含むことを特徴とする請求項 2 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 5】 前記解析工程がコンピュータ手段により測定データを解析する工程を含むことを特徴とする請求項 1 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 6】 前記測定データ生成工程は物体表面のある表面点の相対的高さの尺度を提供するため前記縞コントラストが最小になる既知の走査位置を提供する工程を含むことを特徴とする請求項 1 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 7】 前記測定データ生成工程は干渉模様を空間周波数領域に変換する工程をさらに含み、前記解析工程は物体表面上の各点に対する表面高さを得るため空間周波数の関数として変換干渉模様の位相を調べる工程を含むことを特徴とする請求項 1 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 8】 前記変換工程は干渉模様をフーリエ解析によって空間周波数帯域に変換する工程を含むことを特徴とする請求項 7 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 9】 前記照明工程はレーザー光源で減感干渉計手段を照明する工程を含むことを特徴とする請求項 1 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 10】 前記照明工程は白熱電球光源で減感干

渉計手段を照明する工程を含むことを特徴とする請求項 1 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 11】 前記照明工程は発光ダイオード光源で減感干渉計手段を照明する工程を含むことを特徴とする請求項 1 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 12】 前記照明工程は等価コヒーレンス長からなる深さ範囲内の高コントラスト減感干渉縞を提供する工程を含むことを特徴とする請求項 1 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 13】 前記測定データ生成工程は走査位置の関数としての強度の変量を提供するために物体の深さ走査をする工程を含むことを特徴とする請求項 1 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 14】 前記深さ走査工程は減感干渉手段によって照明された表面に実質的に垂直な方向に物体を変位させる工程を含むことを特徴とする請求項 13 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 15】 前記測定データ生成手段は各画素の 1 つに対しインターフェログラムアレイを提供するため物体の連続した深さ走査の間に複数の強度測定を実行する工程をさらに含むことを特徴とする請求項 14 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 16】 前記測定データ生成手段は各画素の 1 つに対しインターフェログラムアレイを提供するため物体の連続した深さ走査の間に複数の強度測定を実行する工程をさらに含むことを特徴とする請求項 13 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 17】 前記等価コヒーレンス長の範囲が、次式

$$|p + z - z_0| \leq L/2 \dots\dots (1)$$

(式中、L は等価コヒーレンス長、p は物体表面上の局所表面高さ、z は走査位置、z₀ は定数、p は物体表面上の位置で変化し、物体表面形状の尺度を含む) で決定される深さ範囲であることを特徴とする請求項 1 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 18】 前記測定データ生成工程は減感干渉計手段に対して物体を既知の量だけ変位させ、ほぼ同時に電子記憶手段により光検知データを記録する工程を含むことを特徴とする請求項 1 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 19】 前記測定データ生成工程は前記光検知データを供給するため画素アレイに対し干渉模様を変換する工程をさらに含むことを特徴とする請求項 18 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 20】 前記適切な作業距離が物体表面上の構造の深さより大きいことを特徴とする請求項 18 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 21】 前記信号が略振動信号からなることを特徴とする請求項 1 記載の大等価波長を用いた物体表面

形状測定方法。

【請求項 2 2】 前記信号が略振動信号からなることを特徴とする請求項 1 8 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定方法。

【請求項 2 3】 物体の表面形状を測定するための光学的形状測定システムであって、
 関連波長を有する照明手段と、
 前記照明手段によって照明されるよう照明手段に対して設置され、複数の光線で物体をほぼ同じ場所でしかも異なる入射角で照明し、照明手段の関連波長より長い関連等価波長を有し、物体に対し適切な作業距離に設置され、等価コヒーレンス長により定義される範囲以内に高コントラストの干渉縞を生み出すことができる減感干渉計手段と、
 前記干渉計手段に対して設置され干渉模様を検知する検知手段と、
 物体を載せ、いかなる干渉効果も等価コヒーレンス長の範囲内に制限し、干渉縞に対応する信号とその縞コントラストに対応する包絡線とからなる信号包絡線によって変調された等価波長に関する信号を含む強度の変量を走査位置の関数として提供するため深さ走査を行うため干渉計手段により照明された表面に関してその物体を変位させるため設置された走査手段と、
 形状測定装置の視野内の少なくとも 1 つの画素について一つのインターフェログラムを提供するため強度変量を検知する検知手段と、
 少なくとも 1 つの画素に対応する物体表面の表面高さを提供する手段とを備えたことを特徴とする大等価波長を用いた物体表面形状測定システム。

【請求項 2 4】 前記検知手段は視野内の各画素についての一つのインターフェログラムを提供する手段を備え、前記表面高さ提供手段が各画素についての表面高さを提供する手段を備えたことを特徴とする請求項 2 3 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定システム。

【請求項 2 5】 前記走査手段は物体の連続した深さ走査を行う手段を備え、前記検知手段が物体の連続深さ走査を行う間に複数の強度測定を行うことを特徴とする請求項 2 3 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定システム。

【請求項 2 6】 前記検知手段は検知したインターフェログラムを記憶するための記憶手段をさらに備え、前記表面高さ提供手段が記憶されたインターフェログラムから表面高さを提供することを特徴とする請求項 2 5 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定システム。

【請求項 2 7】 前記等価コヒーレンス長の範囲が、次式

$$|p + z - z_0| \leq L/2 \cdots \cdots (1)$$

(式中、L は等価コヒーレンス長、p は物体表面上の局所表面高さ、z は走査位置、z₀ は定数、これにより p は物体表面上の位置により変化し、物体表面形状の尺度

を含む) により決まることを特徴とする請求項 2 3 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定システム。

【請求項 2 8】 前記照明手段が空間的非コヒーレントな照明光源からなることを特徴とする請求項 2 3 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定システム。

【請求項 2 9】 前記照明手段がレーザーからなることを特徴とする請求項 2 3 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定システム。

【請求項 3 0】 前記照明手段が白熱電球からなることを特徴とする請求項 2 3 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定システム。

【請求項 3 1】 前記照明手段が発光ダイオード手段からなることを特徴とする請求項 2 3 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定システム。

【請求項 3 2】 前記信号が略振動信号からなることを特徴とする請求項 2 3 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定システム。

【請求項 3 3】 前記検知手段は光検知手段を備え、前記走査手段が干渉計手段に対し物体を既知の量だけ変位させ、ほぼ同時に光検知手段によって強度変量を検知する手段を備えたことを特徴とする請求項 2 3 記載の大等価波長を用いた物体表面形状測定システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は全体として表面の撮像と解析のための精密計測学に関し、特に、表面形状の光学的非接触測定方法に関する。

【0002】

【従来の技術及び発明が解決しようとする課題】加工における共通の問題は表面形状の精密な測定である。計測学を必要とする製造品の項目の例としては、エンジンパーツ、磁気記憶装置の素子、フラットパネルディスプレイ、模様付成形をしたプラスチック表面、機械ポンプ表面とシール、および鋳造した硬貨があげられる。効率的な生産のためには、工業的環境において高速で自動化された品質管理が求められる。

【0003】表面形状測定のための最も普通の測定道具は、機械的スタイラス (stylus) であるが、それは非常に低速で限られた情報しか得られず、物体表面を損傷する恐れがある。座標測定機械として通常知られる自動化システムは、高価で低速であり、普通は連続した作業ライン上 (in-line) の品質管理としてよりも作業ライン外 (off line) の品質管理のために用いられる。マイクロメータやキャリパーのような機械的ゲージは、精度が低く表面形状のプロフィールを得ることはできない。従って、精密な加工には作業ライン上においても作業ライン外においても用いることのできる高速で非接触の光学的物体形状測定手段を提供することが非常に望まれている。そのような手段は、様々の物体サイズ、表面形状および表面組織に適用可能であるべきである。また、その

ような手段は、工業的環境における自動化部品操作と協働可能で、振動に影響を受けないものであるべきである。

【0004】先行技術によれば、幾何光学による光学的測定技術がいくつか提供されている。代表的な例はモアレ縞解析である。この技術は書籍の「光学ショップ試験」第2版、ダニエル マラカラ著（ワイリ、ニューヨーク、1992）の第16章に詳細に記載されている。そのモアレ法はロンキー格子（ronchi ruling）あるいは同様の周期構造の投影と撮像を含み、幾何学的三角分割に等価である。この原理に基づいた市販品がスピードファムスピットファイア（Speedfam-Spitfire）製品グループ（デプレーン、IL）によって製造されたチェックフラット（Chek-flat）である。モアレは粗い面の形状を測ることができるが、機械的スタイラスゲージに比べると一般的に非常に低い精度であり、ある場合には鏡面に対してはまったく機能しない。さらに困難なことには、モアレを幾何学的誤差に対し較正しなければならない。このことは物体表面の深さの変化が大きいとき非常に厄介である。

【0005】また、先行技術には光学干渉計測を用いた計測学的方法がいくつかあり、光の波としての性質を用いて高精度で表面高さの変化の地図を描くことができる。一般の干渉計の例が、例えば書籍の「光学ショップ試験」第2版、ダニエル マラカラ著（ワイリ、ニューヨーク、1992）の第1章に出ている。これらの従来型干渉計手段の多くは、光源の波長（市販の装置では通常 $0.63\mu\text{m}$ ）の4分の1を越える不連続な高さ変化や表面粗さをもつ表面特性をうまく捉えることができない。従って、 $0.16\mu\text{m}$ よりも大きい不連続な表面特性は、解釈することが困難あるいは不可能な干渉位相の曖昧さをもたらす。表面勾配が大きすぎたりして干渉縞を解像あるいは区別することはさらに困難が生じる。その結果、干渉計は多くの加工計測学的問題に対して適切ではないと考えられている。

【0006】従来の干渉計は適用範囲が限られているため、先行技術で、粗面および表面形状における大きな変化に対応できるいくつかの代替的な干渉計測方法と手段を提供されている。明らかな1つの方法は、特別な光源を用いて光の波長を増加させることである例示的方法と装置が、C. R. マンナリンとM. ラッタによる論文「二酸化炭素レーザー光源を用いた粗面干渉測定」（応用光学7（9）1858-1859（1968））に開示されている。しかしながら、そのような方法は、特別な光源、光学部および検知部を必要とし、一般的に非常に高価で厄介である。さらに、例えこのような高価な長波長干渉計であっても、その長い波長の4分の1を越える表面形状の不連続的变化の下では機能しない。

【0007】従来の干渉計の限られた範囲を克服するための別の先行技術からのアプローチとして、R. ルネ

ブスワによって、論文「計測学的定量法における、干渉現象の応用」物理学雑誌3（7）、57-68（1898）において初めて記述されたような、多重波長の使用があげられる。2つ以上の波長における一連の測定により、非常に大きい等価波長が得られ、従来の単一波長干渉計の曖昧さの問題のいくつかを克服できる。表面計測学にこの技術を応用する方法が、T. A. ナスマイアへの米国特許第4,355,899号「干渉計測的距離測定方法」に開示されている。しかしながら、これらの多重波長技術であっても、表面勾配が大きすぎたり粗さが大きすぎたりして干渉縞を解像することが困難になるような場合、正しく機能しない。多重波長干渉計はまた振動によって非常に影響を受ける。

【0008】先行技術によれば、普通使用しない測定構造を使用することにより表面粗さおよび表面勾配に対する測定感度を低減することを企図したいいくつかの代替的干渉計測方法が提供されている。代表的先行技術の減感干渉計は、R. C. ムーアの米国特許第4,325,637号「かすめ入射の位相調整」およびC. ジョナサン、B. フランツェとH. J. ティツィアーニによる論文「斜め入射と観測電子スペckルパターン干渉計」（応用光学33（31）、7307-7311、（1994））に開示されているような斜角照明を用いている。これらのいわゆるかすめ入射干渉計において、照明と観測の角度が斜めであることによって、よりありふれた形態の干渉計に比べて、物体表面における縞密度を低減できる。この低減された縞密度は、光の実際の波長 λ より何倍も長い等価波長 Λ に対応する。等価波長 Λ が大きければ大きいほど、測定装置によって捉えることのできる表面粗さの程度が大きくなる。しかしながら、感度の有意な低減により、法線方向入射に対して大きい照明角度を必要とする。そのような大きな角度によって、物体の適切な照明と結像に関して問題が生じる。また、段差あるいは溝などの表面特性による望ましくない陰影の問題もありえる。そのような先行技術のシステムにおいては、様々の表面反射率を補償するため干渉計の参照ビームと物体ビームの適切なバランスをとる必要性があつて、新たな複雑性が生じる。さらにかすめ入射干渉計は等価波長 Λ の4分の1を越える不連続な高さ変化を有する表面特性を捉えることができない。

【0009】長い等価波長をもつ干渉パターンを生成する別の幾何学的アプローチは、光源光を2つのビームに分け、同じ表面部分を異なった入射角で照明することである。これらのビーム（光線束）が再結合すると得られる干渉パターンは、表面の形状の変化に対してずっと低い感度を有する。この低減された縞密度は、また、等価波長 $\Lambda > \lambda$ によって特徴づけられる。しかしながら、この方法は照明する際の極端な角度を必ずしも必要とせず、干渉ビームの強度のバランスがとれているという利点をも有する。長い等価波長を実現するため異なった照

10

20

30

40

50

明と観測の角度を利用する装置は、本開示において減感干渉計という名称で表す。

【0010】先行技術は減感干渉計のいくつかの実例を提供している。W. イェーリッシュとG. マコッシュによる論文「表面の光学輪郭線マッピング」(応用光学12(7)、1552-1557(1973))において、試験表面にほとんど接するようにおかれた回折格子を用いる減感干渉計が記載されている。単色の平面波による格子の照明により、異なる回折次数に対応するいくつかのビームが生じる。これらのビームが物体表面から反射され、格子によって再結合されて、物体表面の表面輪郭線に似た縞パターンが得られる。さらに、照明における異なった角度の光ビームを利用する別の先行技術が、P. ジャコ、X. コロンナ、ド・レガおよびP. M. ブーンによる論文「平坦性試験のための共通路干渉計」、(SPIE 2248、製造における生産性のための光学、論文18(1994))に記載されている。この装置は球状波面のホログラフィー記録の2つの回折次数の相互作用により作動する。

【0011】イェーリッシュとマコッシュの方法およびジャコその他の方法はいくつかの利点を有するが、適切な作業距離を設定しないので自動光学検査用には適当でない。これらの方法は両方とも物体表面にほとんど接触するように回折素子を載置することを必要とする。これは、これら両方の方法において単一の回折素子が光源光を複数のビームに分け、それらの複数のビームが違った方向に伝播して物体表面の同じ部分を照明しないからである。従って、その2つのビームは、特に粗い表面において、所望の干渉効果を生成するよう適切に方向付けられていない。この問題を回避するただ1つの方法は、回折素子の表面のすぐ近くに物体をもってくることであり、物体と干渉計の何れかの要素との距離として定義される作業距離は、これらのシステムにおいて通常100 μ mより小さい。これは多くの製造工程における検査ニーズにおいて小さすぎる距離である。

【0012】2つの角度からの照明を用いるいくつかの先行技術型の減感干渉計によれば、物体を干渉計の要素とほとんど接触させるという必要性はない。代表的実例がF. H. スミスへの米国特許第3,958,884号に教示されている。スミスは、作業距離が大きくなるように屈折成分と偏光成分の組合せを用いた光源光の分割および再結合の方法をいくつか教示している。これらの方法はジャマン干渉計、複屈折ダブルレット、複屈折ダブルレットプリズムまたはサバルダブルレットプレートの使用を含む。大きな作業距離を有する減感干渉計のさらに別の実例がG. マコッシュへの米国特許第4,498,771号「表面形状の干渉計測の方法と手段」(3:37-4:16)により提供されている。マコッシュにより開示された装置は、ウォラットソンプリズムのような複屈折結晶と鏡系を用い光ビームを物体に導く。

【0013】広帯域照明あるいは拡散照明と共に用いた時の減感干渉計の短所は、有用な測定深度が光のコヒーレンスによって制限されることである。端的に説明すると、ここでいう「コヒーレンス」とは光が2つの部分に分けられ再結合するとき干渉縞を生成する光源の能力を指す。一般に、縞の品質あるいはコントラストは2つのビームの通過する光路差に応じて減少する。非コヒーレントな光源が高コントラストの縞を生成するのは、干渉するビームの光路差がおおよそゼロに等しいように物体の位置を精密に決めたときだけである。非コヒーレントな光源を有する減感干渉計の動作は、ミラウ顕微対物鏡のような従来型の白色光干渉計の動作に類似しており、相違点は干渉効果の大きさが拡大されていることである。ここで「白色光」という用語は、レーザー、低圧アーク灯その他の実質的に単色光放射の光源と比べた時、大きなスペクトル分布を有することを特徴とする照明の何れかを指す。その実際的な結果は、光源が非コヒーレントである時、干渉計の光軸にそった深さが小さい範囲内に入る物体の部分だけに縞模様が見れるということである。この深さの範囲は等価波長の数倍程度であり、種々の製造された大きな物体に対して小さすぎる深さである。

【0014】2つの角度からの照明を用いるいくつかの先行技術型の減感干渉計は、光源の波長に影響されず、従って白色光でうまく機能する。そのようなシステムの1つが、1994年11月7日および1994年12月28日にそれぞれ出願された同時係属米国特許出願第08/334,939号および第08/365,589号の「回折光学を用いた物体形状測定方法及び装置」に開示されている。2つ以上の回折要素の組み合わせを用いることにより、上述の同時係属特許出願(その内容はここに引用によりその全部を特定の発明の一部として取り入れる)に記載された装置は、測定面を適切な作業距離に投影する。これらの出願により教示された望ましい実施態様は、光源波長 λ に実質的に依存しない等価波長 Λ を有する。従って、白色光源を含む様々の光源を用いることができる。しかしながら、もし光源が拡大されているとき、すなわち大きな出射面積を有し、したがって空間的に非コヒーレントなビームを出射する時、干渉計の光軸に沿った深さが小さい範囲内に入る物体の部分だけに縞模様が見れる。この深さの範囲もまた等価波長の数倍程度であり、同じく種々の製造された大きな物体に対して小さすぎる深さである。

【0015】もし物体表面が粗ければ、異なった入射角のビームを利用する減感干渉計の全てについて一般的な困難点が存在する。粗い表面において良品質の縞模様は、例えば光源光が完全にコヒーレントである場合でも、2つのビームが実質的に同じ場所で表面に衝突する時にのみ得られる。従って物体表面が粗い時、干渉計の光軸に沿った小さい深さの範囲においてのみ計測を行うことができる。全ての幾何学的に減感した干渉計のこの特性

は、その有用性を厳しく制限する。

【0016】これらの観察から、先行技術の減感干渉計は長い等価波長により容易になるある測定作業に対し多くの利点を有することが結論できる。しかしながら、表面形状において大きな変化を有する製造パーツを捉える能力において多くの制限がある。さらに、ここで述べた減感干渉計の何れも、等価波長の4分の1を越える不連続表面特徴あるいは平均表面粗さをもつ物体を測定する能力がない。

【0017】表面形状測定のための、ある1つの全く異なる干渉計測定技術として、機械的走査機構 (mechanical scanning mechanism) と白色光で動作する従来の干渉計に基づくものがあげられる。この技術は本発明の開示において走査白色光干渉計あるいはSWLIとして参照する。SWLIを用いる表面形状の3次元測定のための代表的な方法が、N. バラスブラメイニアンへの米国特許第4,340,306号に開示されている。この特許は、機械的に走査した参照鏡と、2次元検知子アレイとコンピュータ制御装置を備えた白色光干渉計について記載している。開示されたその方法は、参照鏡または物体のどちらかを離散処理方法で走査し、各走査位置ごとに各画素の縞コントラストを測定し、このようにして各表面点に対して最大縞コントラストの位置を決定することを含む。コントラストが最大である走査位置は、特定の表面点の相対高さの尺度である。バラスブラメイニアンにより教示されたSWLIの方法は、光学素子のようないくつかの鏡面に適している。

【0018】もう1つ別の先行技術のSWLI技術が、1994年9月9日出願された米国第08/014 707号の「インターフェログラムの空間周波数解析による表面形状測定のための方法と装置」という名称の同時係属米国特許出願に教示されている。この開示による物体の形状を測定するための光学システムは、多色光源あるいは白色光源と、機械的走査装置と、2次元検知子アレイと、干渉データから表面高さを測定するデジタル信号処理手段とを備えた干渉計からなる。干渉計によって照明された表面におおよそ垂直な方向に物体を走査することにより、視野内の各画像点に対するインターフェログラムが同時に生成され、その際検知子データがデジタルメモリに記録される。これらのインターフェログラムは次にフーリエ解析により空間周波数領域に変換され、各点の表面高さが空間周波数の関数として複素位相を調べることにより得られる。最終段階は、高さデータと対応する画像平面座標から構成された完全な3次元画像の生成である。

【0019】様々の先行技術のSWLIの方法と手段は、ある種の物体および表面に対して有用であるが、それらは重要でかつ基本的な短所を有する。例えば、視野が狭いことや、物体反射率の変動に対する鋭敏性が高いことや、他の多くの光学表面計測の形態に比して測定時間が遅いことや、振動に対する鋭敏性が高いことなどが

あげられる。これらの制限は、光の波長および対応する縞密度に関連している。

【0020】先行技術のSWLIのもっとも重要で基本的な短所の1つとして、一般的に視野が、標準顕微鏡対物レンズによって捉えられる程度の大きさであることがあげられる。正しく機能するためには、SWLI装置において干渉データを電子的に記録する検知子は、干渉縞密度と比較して十分に高い解像度を持たなければならない。先行技術のSWLI装置の視野が増大した時、縞密度は解像するには高すぎる値になり易い。これは粗面を扱うときに顕著である。鏡面に対する勾配許容性は視野サイズとともに直線的に減少し、粗面測定のために必要なスペックル効果は、対物レンズの開口数(NA)が視野の増大とともに直線的に減少する時のみ解像性がある。集光量はNAの平方で減少するので、粗面からスペックルパターンを解像する必要があることは非常に期待はずれである。光の損失があることは表面積が大きくなるとそれだけ強力な照明器が必要になることを意味する。さらに悪いことには、縞コントラストが非常に変動し易いパラメータであり、測定品質が、参照ビームと物体ビーム強度との間のバランスに決定的に依存することである。

【0021】大きな表面領域を測定することが困難なため、SWLIに基づく唯一の市販装置は顕微鏡であり、通常直径が5mmより小さい円形視野を取り込むことができる。その装置としては、例えばザイゴ(Zygo)コーポレーションによるニュービュー(NewView)100や、WYKOコーポレーション(ツーソン、アリゾナ)によるRSTや、フェーズシフトテクノロジー社(ツーソン、アリゾナ)によるマイクロキサム(MICROXAM)-EXや、マイクロマップ(MicroMap)(ツーソン、アリゾナ)による512光学形状測定器などがあげられる。したがって、製造のための測定道具を実質的に必要とするにもかかわらず、先行技術は顕微鏡部品(Microscopic parts)以外のものに用いるSWLI装置を提供しない。

【0022】先行技術にあるSWLI技術のさらに別の基本的な欠点は、データ取得が極めて遅いことである。例えばWYKOコーポレーションによって製造されたRSTは、表面深さ毎秒0.5ミクロンの割合でデータを取得する。したがって1mmの表面特徴を有する表面は走査するため30分以上かかる。速度が遅いことは、走査位置の関数として高速に変動する干渉効果の結果である。正確な測定を行うためには、これらの変動を詳細に記録することが必要になる。通常これは1画素当たり走査動作75nm毎に1回測定するという割合になる。速度が遅いことは、測定中、振動に対する高い鋭敏性や熱的変形や機械的歪などの問題をさらにもたらす。

【0023】SWLIのさらに別の基本的な欠点は振動に対する高い鋭敏性であり、これは1つにはデータ取得速

度が遅いこと、1つには干渉縞パターンの鋭敏性が極めて高くほんの少量の振動でもたやすく壊れてしまうことに起因する。SWLI装置は通常大きな取付具と高価な振動遮断器を必要とする。これだけの予防措置をとっても、SWLI装置は普通の生産環境に比べて相対的に静かな環境に制限される。

【0024】生産された部品を高速に大面積で測定する必要に迫られているため、SWLIの適用範囲を広げる努力が先行技術において幾つか払われてきた。例えば、P. deGrootおよびL. Deckによる「白色光インターフェログラムのサブナイキスト標本化 (sampling) による3次元撮像」(光学通信18(17)、1462-1464(1993))という題の論文に教示されている方法は、データ取得の速度を改善しそれにより装置の深さ領域を改善するために、まばらな (sparse) データ標本化を用いている。それにもかかわらず、このまばらなデータ標本化をもってしても、高密度の干渉縞パターンを正確に標本化する必要性のため、SWLIによるアプローチは基本的に低速である。SWLI顕微鏡における測定速度を増加させるもう1つの先行技術の試みが、L. デックによる1995年3月28日発行の共通に所有される米国特許第5,402,234号「コヒーレンス走査干渉計測におけるデータの高速取得のための方法と装置」に開示されている。デックにより記載されたシステムは、各画素についてインターフェログラムのもっとも有用な部分を選び出し記憶する特別のアルゴリズムとデータバッファを用いる。この方法によれば3次元画像を生成するのに必要なデータ処理の量が実質的に少なくなる。デックにより教示された原理はザイゴ (Zygo) コーポレーション (コネチカット州、ミドルフィールド) により製造されたニュービュー (NewView) 100の製品に取り入れられている。しかしながらニュービュー100も依然として高密度干渉縞模様の正確なデータサンプルを必要とする。従って、測定速度は依然として非常に遅く、たった毎秒表面深さ2ミクロンの割合でデータを取得する。

【0025】SWLIの有用な応用を増加させるもう1つの先行技術の試みがT. ドレゼル、G. ホイスラーおよびH. ベンツケによる論文「コヒーレンスレーダによる粗面の3次元感知」(応用光学31(7)、919-925(1992))に記載されている。この開示の光学システムは、大きく粗い表面からの平均スペックルサイズを増大させるための調節可能な開口数 (NA) と、2つの機械的アクチュエータの特別の組み合わせを用いる。そのアクチュエータの1つは小さな範囲で参照ミラーを変位させるためのもので、もう1つは離散ステップにより物体を走査するためのものである。その論文の図面のいくつかには直径が5mmより大きい物体を含む3次元物体の画像 (graphical images) が示されている。しかしながら、大きな物体に対する低レベルの光と、大量のデータを処理する必要性のため、装置の実用的価値がきびしく

制限される。しかもデータ取得手順はとりわけ遅く高速光学検査に適していない。

【0026】このように、SWLIの有用な応用を増加させる先行技術の試みは次のようにまとめられる。機械的スタイラスはある種の表面特徴を測定するのに有用であるが、非常に遅く、限られた情報しか得られず、物体表面を損なう恐れがある。幾何光学に基づく先行技術の光学装置は、機械的スタイラスにより提供される装置より一般的に精度が劣り、またどのタイプの表面に対しても機能するというわけではない。従来型の干渉計は、光学素子の非常に高精度の測定に対し有用であるが、多くの製造上の検査作業に適していない。多重波長干渉計は、鏡面上の段差や溝によるいくつかの不明瞭さの問題を解決できるが、表面勾配と粗さについて、単一波長干渉計とほとんど同じ制限をとまう。減感干渉計は大きな等価波長で非常にたやすく見ることでできる表面に対して有利であるが、等価波長に比較して大きな深さの変動をとまう表面の場合や、等価波長の4分の1よりも大きい不連続の特徴をとまう表面の場合うまく機能しない。したがってSWLIの方法は視野が狭く、表面反射率の変動に対して敏感であり、非常に遅く、振動に対して極めて敏感である。

【0027】従って、精密な製造のための物体表面を計測する非接触光学手段に対する必要性が極めて高いにもかかわらず、先行技術はそのような手段を提供していない。光学的表面形状測定の公知の方法は工業的環境に適さず、表面の大きさや形状や状態に対する柔軟性 (flexibility) が十分でなく、自動化された (automated) 部品操作に適さない。従って、表面形状の精密な測定のための正確で高速で柔軟 (flexible) な方法と装置が求められているが、いまだに実現していない。

【0028】この出願は同時係属米国出願「回折光学を用いた表面形状を測定する方法と装置」(1994年11月7日出願第08/334 939号および1994年12月28日出願第08/365 589号)に関連しており、それらの出願の内容は特定のここに引用によって本発明の一部とするが、それらに対する改良になっている。

【0029】

【課題を解決するための手段】本発明は、減感干渉計手段から生成される減感干渉縞を用いて物体に対し適切な作業距離から物体表面の形状を測定する方法であって、前記減感干渉縞を供給するために関連波長を有する光源によってその光源関連波長より長い関連等価波長を有する減感干渉計手段を照明する工程と、いかなる干渉効果も等価コヒーレンス長の範囲内に制限し、前記干渉縞に対応する信号とその縞コントラストに対応する包絡線とからなる信号包絡線によって変調された等価波長に関する信号を含む変量を供給するために減感干渉計手段に対し物体を変位させることにより減感干渉計手段の視野内の少なくとも1つの画素に対応する測定データを生成す

る工程と、各画素に対応する表面高さを決定するため測定データを解析する工程とからなることを特徴とする大等価波長を用いた物体表面形状測定方法を提供するものである。

【0030】他の発明は、物体の表面形状を測定するための光学的形状測定システムであって、関連波長を有する照明手段と、前記照明手段によって照明されるよう照明手段に対して設置され、複数の光線で物体をほぼ同じ場所でも異なる入射角で照明し、照明手段の関連波長より長い関連等価波長を有し、物体に対し適切な作業距離に設置され、等価コヒーレンス長により定義される範囲以内に高コントラストの干渉縞を生み出すことができる減感干渉計手段と、前記干渉計手段に対して設置され干渉模様を検知する検知手段と、物体を載せ、いかなる干渉効果も等価コヒーレンス長の範囲内に制限し、干渉縞に対応する信号とその縞コントラストに対応する包絡線とからなる信号包絡線によって変調された等価波長に関する信号を含む強度の変量を走査位置の関数として提供するため深さ走査を行うため干渉計手段により照明された表面に関してその物体を変位させるため設置された走査手段と、形状測定装置の視野内の少なくとも1つの画素について一つのインターフェログラムを提供するため強度変量を検知する検知手段と、少なくとも1つの画素に対応する物体表面の表面高さを提供する手段とを備えたことを特徴とする大等価波長を用いた物体表面形状測定システムを提供するものである。

【0031】本発明は、減感干渉画像を用いて物体の表面形状を物体に対する適切な作業距離から測定する方法とシステムであり、この光学的形状測定システムは、白熱電球や発光ダイオードやレーザーからなる光源（照明手段）と、光源光の波長よりはるかに長い等価波長という特徴をもつ減感干渉計と、光学ステージからなる機械的走査システム（走査手段）と、CCDやフォトアレイを備えたカメラからなる電子的検知手段と、コンピュータからなるデータ処理手段で構成される。

【0032】本発明によって、例えば、白熱電球や発光ダイオードやレーザーのような光源により照明された減感干渉計からなる光学的表面形状測定装置を提供することができる。減感干渉計は光源波長 λ より大きい等価波長 Λ と、物体に対する適切な作業距離（例えば1mmより大きい）と、等価コヒーレンス長として定義される深さ範囲 L の中で高コントラストの干渉縞を生成する能力とによって特徴づけられる。フォト検知子のアレイを備えたカメラにより、画素のアレイに対し、干渉縞が電気信号に変換される。

【0033】減感干渉計の視野内の1つ以上の画点すなわち画素に対する測定データは、コンピュータにより、ある既知の距離だけ物体を減感干渉計に対し変位させた際の走査位置の関数としての強度変動である。この強度変動を測定データとして電子的検知手段（カメラ）で検

知し、かつ同時に検知した測定データ（フォト検知子データを）電子メモリに記録することにより生成することができる。走査位置の関数としての強度変動は、干渉効果を等価コヒーレンス長 L 以内の範囲に制限する信号包絡線（envelope）により変調した、等価波長 Λ に関する振動信号として表される。振動信号は干渉縞に対応し、振動信号の包絡線は縞コントラストである。

【0034】次に、測定データはコンピュータによって解析され、各画素に対応する表面高さが計算される。例えば、本発明の方法においては、縞コントラストが最大になる走査位置は、ある表面点の相対高さの尺度である。あるいはまた、本発明のもう1つ別の方法によれば、フーリエ解析によりインターフェログラムが空間周波数領域に変換され、空間周波数の関数としての複素位相を調べることにより、各画素点に対する表面高さが得られ、表面形状が測定される。

【0035】本発明は、先行技術による減感干渉計の範囲制限を克服し、かつ同時にどの先行技術による走査白色光干渉計よりもはるかに広い視野と高い走査速度を提供するものである。本発明のこれらおよび他の特徴は、次の発明の詳細な説明と添付の図面をあわせて読むことにより、いっそう明らかになるであろう。

【0036】

【発明の実施の形態】以下、図に示す実施例に基づいて本発明を詳述する。なお、本発明はこれによって限定されるものでない。本発明は、減感干渉縞を用いて、物体に対して適切な作業距離から物体表面形状を光学的に測定する方法とシステムであり、このシステムは、光源と、光源光の波長よりはるかに長い等価波長を有する減感干渉縞を生成する減感干渉計と、物体を減感干渉計に対して変位させる機械的走査機構と、減感干渉縞を1つ以上の画素の測定データとして検知する電子的検知手段と、検知した測定データをメモリに記憶し解析した後各画素の表面高さに変換するコンピュータからなるデータ処理手段で構成される。干渉計の視野内の1つ以上の画点すなわち画素についての測定データとしては、機械的走査機構で物体を干渉計に対して変位させ、走査位置の関数としての強度変動を電子的検知手段で検知し、コンピュータの電子記憶装置（メモリ）に記録することによって生成される。走査位置の関数としての強度変動は、等価コヒーレンス長以内の範囲に干渉効果を制限する信号包絡線により変調し、等価波長に関するほぼ振動する信号として表すことができる。この振動性の信号は干渉縞に対応し、包絡線は縞コントラストである。次のステップでインターフェログラム（干渉光強度の変化、縞コントラスト）のアレイ（パターン）はコンピュータによって解析され、各画素に対応する表面高さが計算される。このとき、インターフェログラムはフーリエ解析によって空間周波数領域に変換され、空間周波数の関数としての複素位相を調べることにより各画素点の表面高さ

を決定し物体の表面形状を測定する。

【0037】図1は本発明の方法とシステムにおける基本構成を示す説明図であり、物体20の表面形状を測定するために組み立てられた発明の光学表面形状測定システムの望ましい実施態様を示す。図1において、照明光は光源30により供給され、光源としては例えば白熱電球や、発光ダイオードや、拡散素子をもつレーザーや、同様の空間的に非コヒーレントな照明用光源があげられる。光ビーム40は干渉計50に導かれるが、干渉計50は減感した干渉計であることが望ましい。干渉計50は物体をビーム60で照明するが、このビームは物体を実質的に同一の場所で異なった入射角で照明する2つ以上のビーム（図示せず）からなっている。干渉計50の望ましい特色としては、光源波長 λ より大きい等価波長 Λ 、物体20との適切な作業距離（例えば1mmより大きい）および等価コヒーレンス長としてここで定義される範囲Lの中で高コントラストの干渉縞を生成する能力があげられる。干渉計50は、物体表面を表す干渉縞をビーム70によって電子検知器80上に投影することが望ましい。ここで電子検知器としては、例えば閉回路テレビカメラや、直線状検知子アレイや、単一素子検知子などがあげられる。

【0038】干渉計によって照明される表面と実質的に垂直な方向に物体20を変位させるために配置された機械的走査載物台90の上に物体20を載置することが望ましい。載物台90による物体20の変位は、ここでは深さ走査（垂直走査）と呼ぶ。載物台90はコンピュータ100により制御されることが望ましい。本発明の望ましい方法においては、物体20を連続的に深さ走査する際に電子検知器80により、複数の強度測定が行われる。これらの測定結果はコンピュータ100のダイナミックメモリ（図示せず）のなかに記憶させることが望ましい。このようにして得られたデータは、インターフェログラムのアレイとしてデジタルフォーマットで記憶させることが望ましく、走査位置の関数としての強度の変動を表すものとして、装置の視野内の各画点あるいは画素に対して1つずつのインターフェログラムが対応する。

【0039】図2に1つの画素に対する深さの関数としての測定強度の典型的変動が示されている。通常干渉縞と呼ばれる周期的振動は、次式で表される深さ範囲内に収まることが望ましい。

$$|p + z - z_0| \leq L/2 \dots (1)$$

ここで、Lは等価コヒーレンス長で、pは局所表面高さであり、zは走査位置であり、 z_0 は定数である。pの値は通常、物体表面上の位置により変化することが望ましく、物体表面形状（object surface topography）の尺度である。広い範囲にわたって物体を走査することにより、全ての表面点についてインターフェログラムを収集することが望ましい。

【0040】例えば、図2に示されるようなインターフェログラムの解析方法がいくつか、この技術分野において公知である。その最も簡単な方法は走査位置の関数としてのインターフェログラムにおける振動信号の強度を測定することによる。p = $z_0 - z$ のとき、信号は最も強い。従って、信号強度は各画素に対する表面高さpを指示する。この方法によって、有効なコヒーレンス長Lの範囲を越えた変動であっても物体表面形状における非常に大きな変動を測定することが可能になる。また、同時係属中の1994年9月9日出願の米国特許出願第08/014,707号「インターフェログラムの空間周波数解析による表面形状測定のための方法と装置」に教示されている原理に従い周波数解析により解析を進めることもできる。この出願の内容は引用によって本発明の一部とする。

【0041】従って、これらの創意に富むデータ取得と解析方法は先行のSWLI方法に用いられた手順に類似している。しかしながら、この創意に富む装置のインターフェログラムは光源波長 λ よりむしろ等価波長 Λ によって特徴づけられているので、所定の走査長のため必要なデータ点の数は、先行技術に比べ要因 λ/Λ だけ少なくなっている。さらに電子的検出手段は光学的波長 λ により特徴づけられた干渉模様で可能なよりはるかに簡単に干渉縞を解析することができる。従って、先行技術に比べ測定面積を実質的に増やすことができる。

【0042】ここに開示している様々な実施例は非コヒーレントな光源を用いて動作するものを示しているが、物体表面が反射光の空間的コヒーレンスを実質的に弱めるのに十分な粗面であれば、空間的にコヒーレントな光を用いても本発明の目的を達することができる。最も必要なことは干渉計が大きすぎない等価コヒーレンス長Lという特徴を有することである。現在、公知のデータ解析方法では、有益な等価コヒーレンス長の典型的な範囲は次式によって決定される：

$$3\Lambda \leq L \leq 30\Lambda \dots (2)$$

ただし、本発明の意図を逸脱しないこれ以外のLの値も可能である。

【0043】図3に特別な形の減感型干渉計を組み込んだ現在好ましい本発明の一実施例が示されているが、これは1994年11月7日付提出願の第08/334,939号および1994年12月28日付提出願の第08/365,589号の私の同時係属米国特許出願「回析光学を用いた表面形状を測定する方法と装置」の教示に基づいている。この装置を用いた本発明の方法によれば、光源30からの光はレンズ35によって照明光線140にコリメートされる。光線140はまず回析格子120に当たる。回析格子は光線140を光線150と光線160に分ける。次のステップで光線150と160は第二回析格子130によって回析され、次に物体20に当たる。反射するとこれらの光線は回析格子130に再び伝わる。回析格子130はこれら

の光線が回析格子 120 の表面で再合成されるように回析する。再合成された光線は次に共通の射出光線 180 に回析され、カメラ 50 上に焦点が合わせられる。カメラ上で光線 150 と 160 の光学的パス長の差を表す干渉模様が検出される。

【0044】光線 150 と 160 の入射角の相違の結果、物体 20 の垂直変位は深さの関数として測定強度の変動を生じる。走査位置の関数として画像の 1 画素について測定された強度の変動は図 2 に示したものとほぼ同じであり、従って等価波長 Λ と等価コヒーレンス長 L によって特徴づけられる。等価波長は次の式によって計算することができる：

$$\Lambda = \lambda / (\cos(\theta) - \cos(\phi)) \dots (3)$$

(式中、 θ は物体 20 の表面 170 に対する光線 160 の入射角、 ϕ は物体 20 の表面 170 に対する光線 150 の入射角である)。原則的に、いかなる有な波長 $\Lambda \geq \lambda$ も適切な角度 θ 、 ϕ を選択することにより作り出すことができることが分かる。例えば、 $\phi = 20$ 度、 $\theta = 0$ 度であれば、 $\Lambda \approx 16.6 \lambda$ である。

【0045】図 3 の好ましい実施例のための等価コヒーレンス長 L は、数多くの要因で決まるが、主に物体 20 の表面のこぼこの程度と光源 30 の照射面積に関係している。従って、照射面積が調整可能であるか、一般に光源の空間的コヒーレンスの程度が変更できれば、等価コヒーレンス長 L の大きさを適用に応じて調整することができる。

【0046】図 4 に別の形の減感型干渉計を用いた本発明の一実施例が示されている。図 4 に示された実施例において、光線 230 からの光はレンズ 235 によって光線 200 にコリメートされる。光線 200 は反射鏡 205 によって反射する。ビームスプリッター 210 はこの光を光線 240 と光線 245 に分ける。光線 240 は鏡 250 から反射し、物体 20 に入射角 ϕ で向けられる。光線 245 は鏡 255 から反射し、物体 20 に入射角 θ で向けられる。物体 20 からの反射後、光線 245 および 255 はそれぞれ鏡 260 および 265 から反射し、次にビームスプリッター 270 によってビーム 275 に再合成される。レンズ 285 は物体 20 の像をカメラ 290 上に結ぶ。適切に調整した場合、図 4 に示した実施例における様々なビームパスにより干渉模様が生じるが、等式 3 により決定される等価波長 Λ は減少する。適切に調整した場合、非コヒーレントな光源を用いてもこの干渉計は動作する。しかしながら、非コヒーレントな光源をこの実施例と共に用いた場合、高い縞コントラストの領域は等価コヒーレンス長 L に限られる。等価コヒーレンス長は光源のスペクトルのバンド幅および光源の大きさの双方に関連している。図 4 に示した実施例のその他の特徴、例えばデータ取得、解析方法は、前述の本発明実施例と実質的に同じである。

【0047】図 5 に別の形の減感型干渉計を用いた本発

明のもう一つの実施例が示されている。図 5 に示された実施例において、光源 330 からの光はレンズ 335 によって光線 300 にコリメートされる。光線 300 は複屈折素子 310 によって互いに直角な 2 つの光線 340 と光線 345 に分けられる。この複屈折素子はウォラストンプリズムまたは光線の 2 つの偏光を空間的に分離する光学的構成要素のようなものであってもよい。レンズ 350 は物体 20 上に光線 340 と 345 の焦点を共に結ぶ。物体 20 からの反射後、光線 340 と 345 は、これらの光線の焦点を再び結ぶレンズ 360 によって集められるまで発散する。複屈折素子 370 は光線 340 と 345 を再合成して光線 375 にする。偏光子 380 は光線 340 と 345 の偏光の投影を合成して共通の偏光にし、干渉効果を生み出すような方向に置かれる。レンズ 385 は次に物体の像をカメラ 390 上に結ぶ。適切に調整した場合、図 5 に示した実施例における様々な光線パスは物体形状を表す干渉模様の生み出すが、等式 3 により決定される等価波長 Λ は減少する。適切に調整すれば、非コヒーレントの光源を用いてもこの干渉計は動作する。しかしながら、非コヒーレントな光源をこの実施例と共に用いた場合、高い縞コントラストの領域は等価コヒーレンス長 L に限られる。等価コヒーレンス長は光源のスペクトルのバンド幅および光源の大きさの双方に関連している。図 5 に示した実施例は物体 20 の単一点または線形の像に最も適している。単一点または線形の像の場合、物体 20 の完全な 3 次元形状の構成を容易にするために水平走査機構 (図示しない) を載物台 90 に組み込むことに利点があると分かるだろう。図 5 に示した実施例のその他の特徴、例えば、データ取得、解析方法は、前述の本発明実施例と実質的に同じである。

【0048】当業者であれば、本発明の意図を逸脱する事なく開示した方法および装置の形または細部を代用、省略、変更できることが理解できるだろう。

【0049】

【発明の効果】本発明によれば、この創意に富む干渉計を利用した物体表面形状測定方法及びシステムは以下に示す効果を奏する。粗い表面および鏡のような表面のいずれも測定できる。大きな歪みや勾配のある表面を測定することができる。従来の SWLI 技術より広い視野が可能になる。従来の SWLI 技術より高速度走査が可能になる。従来の減感型干渉計より深さ走査 (垂直走査) の範囲が大きい。大方の従来の減感型干渉計より作業距離が大きい。大方の従来の減感型干渉計に比べ振動の影響が少ない。双方の干渉光線が物体表面から反射することから優れた縞コントラスト得られる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の方法とシステムにおける基本構成 (components) を示す図である。

【図 2】視野内の 1 つの画素に対する走査位置の関数としての測定強度の変動を示すグラフである。

【図 3】 本発明の望ましい実施態様を示す図である。

【図 4】 本発明の別の実施態様を示す図である。

【図 5】 本発明のさらに別の実施態様を示す図である。

【符号の説明】

20 物体

30 光源

40 光ビーム

* 50 干渉計

60 光ビーム

70 光ビーム

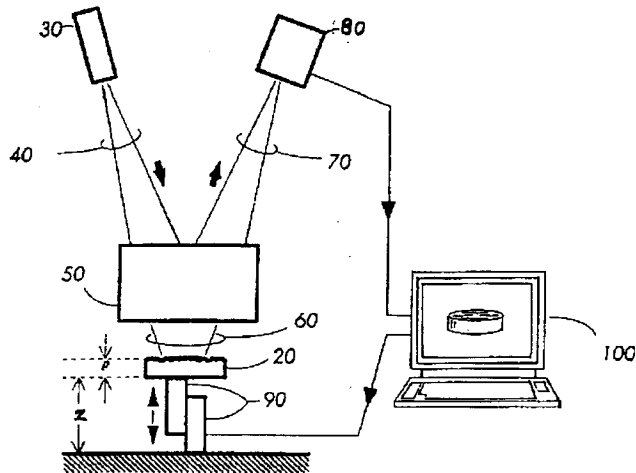
80 光電検知器

90 ステージ

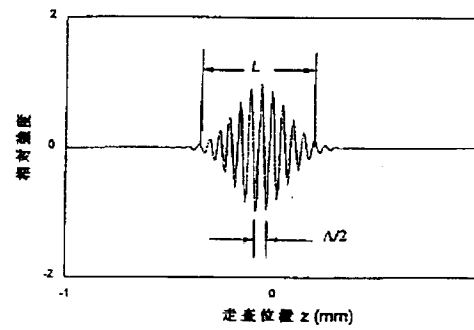
100 コンピュータ

*

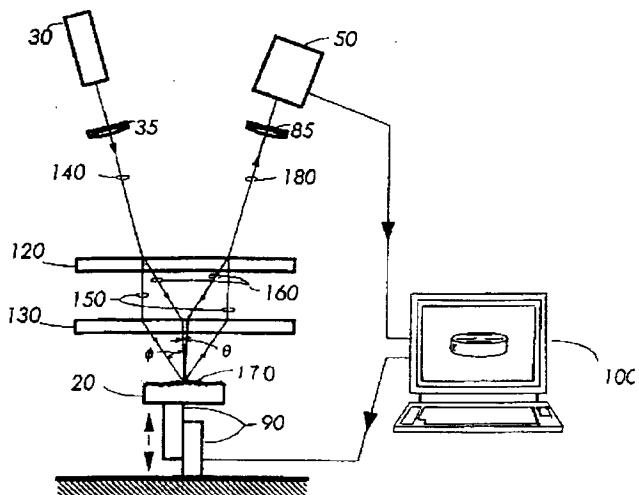
【図 1】



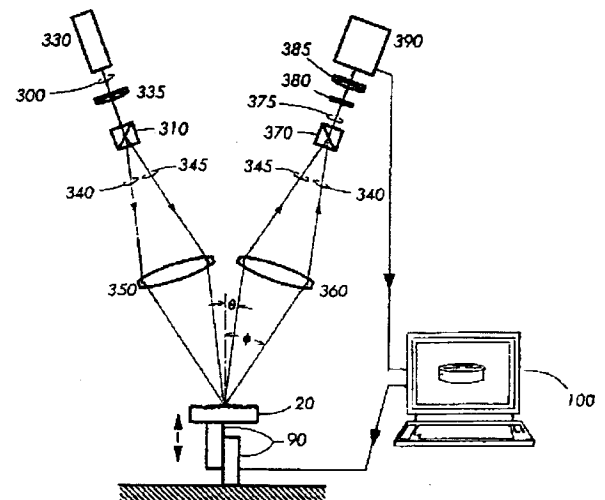
【図 2】



【図 3】



【図 4】



【図 5】

